

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté de Science et Technologie



**Mémoire de Fin d'Etude : Master**

**Département : Génie des procédés**

**Spécialité : Génie des Procédés des Matériaux**

**Étude du verre Float de l'industrie verrière Mediteranean  
Float Glass "MFG" Algérie**

**Présenté par :**

AMIROUCHE Ahmed Razik

**Encadré par :**

Pr. SATHA Hamid

**Année universitaire : 2020/2021**

## Dédicace

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que: Je dédie cette thèse de master à :

### Ma chère maman

Autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi. Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, tu as toujours été présente à mes côtés pour me consoler quand il fallait. En ce jour mémorable, pour moi ainsi que pour toi, reçoit ce travail en signe de ma vive reconnaissance et ma profonde estime. Puisse le tout puissant te donner santé, bonheur et longue vie afin que je puisse te combler à mon tour.

**A mes sœurs** : Dr .Amirouche Imane, Dr. Amirouche Amirah

**A mes frères** : Amirouche Ramy, Mohamed Amine iftini et  
Walid Merad

**A mon cher beau-frère**: Mohamed Lotfi.

A mes très chers amis : Anis, Abdel Baki, saif , bilel , kenz,  
Mehdi ,wael, Randa, Boutheina,, Nour elhouda, Yasmine,  
Hana ,Imane, Hadil

A tous les membres de ma promotion.

A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.

A tous ceux qui me sens chers et que j'ai omis de citer

## Remerciements

Avant toute chose, je tiens à remercier ALLAH tout puissant, qui m'a aidé et m'a donné la patience, la santé et le courage durant mon parcours pédagogique.

Je tiens à remercier en premier lieu mon encadreur Mr: SATHA Hamid Professeur au Département de Génie des Procédés, pour ses conseils, patience et compréhension.

Un grand remerciement à mon encadreur de stage Mr ben Youcef, Chef de ligne de production de verre plat en MFG, qui m'a formé et tout au long de ce mémoire avec beaucoup de patience et de pédagogie.

Je tiens à remercier aussi à Mr: Meki Mouloud, Chef de laboratoire (LCO) et l'ensemble des ingénieurs de (Ligne float) et (laboratoire central de contrôle de qualité) de « MFG », pour la formation et les conseils, la patience et la gentillesse au cours de ces jours de stage.

Je remercie, les personnes qui m'ont encouragé et soutenu, de près ou de loin, durant la réalisation de ce travail.

## ملخص:

يتمحور هذا العمل حول دراسة مختلف مراحل وخطوات تصنيع الزجاج العائم والتي تعتبر تقنية جديدة وثرورية لصنع الزجاج المسطح، بالإضافة إلى دور المكونات (السليكا، كبريتات الصوديوم، الدولوميت، أكسيد الحديد، الخ في تشكيل الزجاج. وتم الحصول على نتائج مثيرة للاهتمام بشأن سلوك في الزجاج أثناء عملية التشكيل والصلب، بالإضافة إلى تبين تأثير درجة الحرارة على سمك الزجاج واللزوجة وسرعة سحب شريط الزجاج على حد سواء. تمكنا خلال عملنا هذا أيضا من إيجاد حلول عملية للمشاكل التي واجهتها خلال والصلب عملية الزجاج.

**الكلمات المفتاحية:** الزجاج، التحول الزجاجي، نقطة الانصهار، اللزوجة، القصدير، توب رول، التصليب

## Résumé

Dans ce travail, nous sommes intéressés à l'étude de différentes étapes du procédé « float glass » qui est une nouvelle technique d'élaboration de verre plat, le rôle de chaque constituant (la silice, le sulfate de sodium, la dolomie, l'oxyde de fer,...etc.) dans la mise en forme de verre. Ainsi que les techniques utilisées dans le recuit.

Des résultats intéressants ont été obtenus concernant le comportement du verre au cours de formage et de recuit. On a pu montrer l'influence de la température sur l'épaisseur de verre ainsi que la viscosité et la vitesse de tirage de ruban. Durant ce travail on a pu aussi trouver des solutions pratiques pour les problèmes rencontrés au cours du procédé de recuit du verre.

**Mots clés :** verre, transition vitreuse, température de fusion, viscosité, étain, Top Roll, recuit.

## Abstract:

In our work we are interested in the study of various stages of process float glass which is a new technique of making of flat glass, the role of each component (silica, sodium sulfate, dolomite, iron oxide ... etc.) in glass forming.

Interesting results were obtained concerning the behavior of glass during forming and annealing. We were able to show the influence of the temperature on glass's thickness in addition to the influence of viscosity and glass ribbon's pulling speed of. During our work we were also able to find practical solutions to the problems encountered during glass annealing process.

**Keywords:** glass, vitreous transition, melting point, viscosity, tin, Top Roll, annealing.

## Liste des figures

**Figure I. 1 :** Schéma montrant la structure moléculaire de cristal (gauche) et de verre (droite)

**Figure I. 2 :** Variation du volume spécifique d'un verre en fonction de la température.

**Figure I. 3:** Variation du volume (H ou S) d'un verre en fonction de la température.

**Figure I. 4 :** Variation de  $T_g$ , en fonction de la vitesse de refroidissement.

**Figure I. 5 :** Variation de la viscosité d'un verre silico-sodo-calcique en fonction de la température.

**Figure I. 6 :** Représentation schématique plane du réseau d'un verre de silicate alcalin.

**Figure I. 7 :** Schéma de fonctionnement du procédé Pittsburgh

**Figure I. 8 :** Schéma de fonctionnement du procédé de laminage

**Figure I. 9 :** Représentation schématique de fabrication de fibres de verres par étirage mécanique

**Figure II. 1 :** Schéma de processus de fabrication du verre flot

**Figure II. 2 :** Four à bruleurs transversaux (coupe transversale)

**Figure II. 3 :** Usure des blocs de parois du four

**Figure II. 4 :** Four de fusion

**Figure II. 5 :** Etenderie

**Figure II. 6:** Découpe de verre

**Figure II. 7:** Enlèvement des bords du ruban.

**Figure II. 8:** Schéma d'enlèvement des bords du ruban.

**Figure II. 9:** Test zébra.

**Figure II. 10:** Verre sans déformation

**Figure II. 11:** Verre déformé

**Figure II. 12:** Le pupitre lumineux

**Figure III. 1:** Image d'un tamiseur type (Retsch AS200)

**Figure III. 2:** Image d'un diviseur rotatif de type (Retsch PT100)

**Figure III. 3:** Photo d'une étuve de séchage

**Figure III. 4:** Photo d'un vibro- broyeur.

**Figure III. 5:** Photo d'un MiniFuse

**Figure III. 6:** Image de la mise en forme de perl

**Figure III. 7:** Photo d'un spectro-analyseurs de type BRUKER S8 TIGER.

**Figure III. 8:** Représentation schématique des casses longitudinaux résultants des contraintes thermiques de forme.

**Figure III. 9:** Représentation schématique des casses transversaux résultants des contraintes thermiques d'épaisseur

**Figure III. 10:** Photo d'un pyromètre de type (HEITRONICS)

**Figure IV. 1:** Courbe cumulative de sable brut d'Ain Ouessara

**Figure IV. 2:** Schéma représente une coupe transversale de deux plaques de verre d'épaisseur différente.

**Figure IV. 3:** Courbe d'évolution de régime thermique en fonction de l'épaisseur de ruban de verre.

**Figure IV. 4:** Classe de nombre de défauts par type.

## **Liste des tableaux**

**Tableau. IV. 1:** Critère d'acceptation de la granulométrie du sable.

**Tableau. IV. 2:** Résultats d'analyses granulométriques (sable d'Ain Ouessara).

**Tableau. IV. 3:** Résultats de mesure de perte au feu.

**Tableau. IV. 4:** La teneur en éléments exigé par MFG.

**Tableau. IV. 5:** Résultats d'analyses par fluorescence X (sable d'Ain Ouessara).

# SOMMAIRE

## Résumés (Arabe, Français & Anglais)

### Sommaire

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Introduction générale ..... | 2 |
|-----------------------------|---|

## Chapitre I : Notions de base sur le verre

|      |  |    |
|------|--|----|
| I.1  | Historique du verre .....  | 7  |
| I.2. | Définition du verre .....  | 7  |
| I.3. | L'état vitreux .....   | 8  |
| I.4. | Transition vitreuse .....  | 8  |
|      | I.4.1. Définition de la température de transition vitreuse $T_g$ ..... | 8  |
|      | I.4.2. Intervalle de transition vitreuse .....                         | 10 |
| I.5. | La viscosité dans les verres.....                                      | 11 |
| I.6. | Constituants d'un verre.....   | 12 |
|      | I.6.1. Les formateurs de réseau.....                                   | 12 |
|      | I.6.2. Modificateurs de réseau .....                                   | 12 |
|      | I.6.3. Composés intermédiaires.....                                    | 12 |
| I.7. | STRUCTURE DU VERRE.....  | 12 |
| I.8. | PROPRIETES DU VERRE .....  | 15 |
|      | I.8.1 Propriétés physiques.....  | 15 |
|      | La transparence .....  | 15 |
|      | Dureté .....   | 15 |
|      | La densité .....   | 15 |
|      | I.8.2. Propriétés thermique.....                                       | 16 |

|   |           |
|---|-----------|
| La dilatation .....                                       | 16        |
| La chaleur spécifique .....                               | 16        |
| La conductivité .....                                     | 16        |
| I.8.3. Propriétés chimiques .....                         | 16        |
| <b>I.9. Les différents types de verre industriel.....</b> | <b>16</b> |
| I.9.1. Verres plats .....                                 | 17        |
| I.9.2 Verres creux .....                                  | 18        |
| I.9.3.Fibres de verres.....                               | 19        |
| <b>I.10. Conclusion.....</b>                              | <b>20</b> |

## Chapitre II : Etapes de fabrication du verre plat

|   |    |
|---|----|
| II.1 Définition du verre Float .....                  | 23 |
| II.2 Composition chimique du verre sodo-calcique..... | 24 |
| II.2.1 Le sable siliceux $\text{SiO}_2$ .....         | 24 |
| II 2.2. Carbonate de soude .....                      | 24 |
| II.2.3 la dolomie .....                               | 24 |
| II.2.4 Le calcaire .....                              | 24 |
| II.2.5 Feldspath.....                                 | 25 |
| II.2.6 Sulfate de soude.....                          | 25 |
| II.2.7 Le charbon .....                               | 25 |
| II.2.8 Oxyde de fer.....                              | 25 |
| II.2.9 Le calcin.....                                 | 25 |
| II.3 La fusion du verre silicaté sodo-calcique .....  | 26 |
| II.3 Fours électriques .....                          | 26 |
| II.4 Fours a bruleurs transversaux .....              | 26 |

|  |    |
|--|----|
| II.4 Les différents ateliers de la ligne ..... | 28 |
| II.4.1 Atelier de fusion.....                  | 28 |
| L'élaboration.....                             | 28 |
| L'affinage.....                                | 29 |
| La gorge.....                                  | 29 |
| Le conditionnement thermique .....             | 29 |
| II.4.2 Bain d'étain .....                      | 29 |
| II.4.3 Etenderie .....                         | 30 |
| II.4.4 Découpe du verre float .....            | 31 |
| II.4.5 Le control qualité .....                | 33 |
| II.5 Conclusion .....                          | 35 |

### **Chapitre III: Matériel et méthodes**

|  |    |
|--|----|
| III.1 Caractérisation de matières premières .....                      | 37 |
| III.1.1 Analyse granulométrique.....                                   | 37 |
| III.1.2 Analyse chimique du sable .....                                | 38 |
| Mesure de perte au feu.....  | 39 |
| Analyse élémentaire par fluorescence X .....                           | 39 |
| III.2 Control de recuit et contraintes thermiques du verre float ..... | 41 |
| III.2.1 Principe de recuit .....                                       | 41 |
| III.2.2 Contraintes thermiques de recuit.....                          | 42 |
| Contraintes thermique de forme .....                                   | 42 |
| Contraintes thermique d'épaisseur .....                                | 43 |
| III.2.3 Réglage de régime thermique .....                              | 44 |
| Thermomètre infrarouge .....   | 44 |

|                        |    |
|------------------------|----|
| Thermocouple .....     | 45 |
| III.3 Conclusion ..... | 45 |

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

|   |    |
|---|----|
| IV.1. Analyse granulométrique.....              | 47 |
| IV.1.1. Critères d'acceptation du sable.....    | 47 |
| IV.1.2. Interprétation des résultats.....       | 48 |
| IV .2. Résultats de calcul de perte au feu..... | 49 |
| IV.3. Analyse chimique.....                     | 49 |
| IV.3.1. Exigence technique de MFG.....          | 50 |
| IV.3.2. Résultats d'analyse.....;               | 51 |
| . IV.4. Problèmes techniques .....              | 52 |
| IV.4.1. Pertes de saturation.....               | 53 |
| IV.4.2. Pertes de qualité.....;                 | 53 |
| IV.4.3. Pertes de mauvaise découpe.....         | 53 |
| IV.4.4. Pertes de bord.....                     | 53 |
| IV.4.5. Pertes de casses.....                   | 53 |
| IV.5. Solutions proposées et conclusion .....   | 57 |
| <b>Conclusion générale</b> .....                | 61 |
| Références bibliographiques                     |    |
| Annexes   |    |

# Introduction générale

### Introduction générale

Le verre est l'un des plus anciens matériaux connus de l'humanité. À l'occasion du centenaire de la physique, un numéro spécial du journal du centre national de recherche scientifique a répertorié «la nature obscure du verre » comme l'une des dix plus grandes énigmes de la physique de ce siècle [1].

Depuis que l'homme a commencé à fabriquer du verre, il s'est beaucoup intéressé aux verres oxydés, notamment ceux contenant de la silice en raison de son abondance naturelle ainsi que la silice assure un prix de revient très faible, elle s'est donc imposée dans l'industrie verrière comme l'ingrédient maître de ces verres. En effet, le verre au silicate présente des propriétés intéressantes comme une haute résistance aux chocs thermiques, une inaltérabilité dans le temps, la capacité de transmettre des informations sous forme de fibres optiques dans le domaine des télécommunications, etc. Cela lui donne une place très importante dans le domaine des matériaux. Il est indispensable et peu coûteux, il a donc un large éventail d'applications dans divers domaines [2].

Le terme « float » fait référence à la dernière technologie de production du verre plat avec un certain niveau de qualité. Ce principe a été découvert par Henry Bessemer au milieu du XIX siècle. Lorsque certaines verrières, comme PPG, ont commencé à expérimenter le procédé float divers brevets ont été déposés aux États-Unis. Au début des années 1960, le verrier britannique Pilkington a développé le procédé du verre float. Ce procédé a révolutionné l'industrie du verre et a conduit à l'abandon progressif des anciens procédés [3].

Dans ce contexte l'objectif principal que nous avons fixé est d'exploiter les différents aspects de cette technique révolutionnaire à partir d'un stage pratique de 30 jours au sein de l'une des sociétés exemplaires dans ce domaine le MFG (Mediterranean Float Glass) qui est considérée parmi les premières qui fabriquent le verre plat en Afrique.

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

- Une partie théorique divisée en deux chapitres :

Le premier chapitre représente des généralités sur le verre, comprenant un historique du verre, les propriétés physico-chimiques, les différents constituants et les techniques d'élaboration.

Le deuxième chapitre est consacré au procédé **float glass**, ainsi que toutes les étapes de fabrication commençant par l'enfournement de la matière première et arrivant au produit fini, ainsi les appareillages utilisés au cours de ce procédé.

- Une partie expérimentale divisée en deux chapitres :

Le premier chapitre représente le protocole expérimental utilisé dans la caractérisation chimique et granulométrique du sable, le contrôle de recuit et contraintes thermiques du verre float.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation et discussion des différents résultats obtenus.

Enfin nous terminerons par une conclusion générale montrant les résultats essentiels obtenus dans ce travail.

# Partie Bibliographique

# Chapitre I

## Notions de base sur le verre

## I.1. Histoire de verre

Le verre existe naturellement depuis des centaines de milliers d'années. L'être humain l'utilisa pour la première fois il y a 100 000 ans sous forme d'une roche volcanique vitreuse riche en silice, de couleur grise, vert foncé, rouge ou noire appelée l'obsidienne (verre naturel d'origine éruptive) afin de fabriquer des bijoux des armes coupantes et même des produits décoratifs.

Les premiers verres fabriqués par l'homme sont originaires de Mésopotamie. Ils sont non transparents, non translucides mais opaques et de couleur verte ou bleue [4].

En V<sup>ème</sup> et le X<sup>ème</sup> siècle est apparue la fabrication du verre plat soufflé, leur fabrication se faisait par deux techniques :

- Le soufflage en couronne, ou soufflage en plateau :

Produit dans l'Ouest de la France et en Angleterre où sa production dura jusqu'au XIX<sup>ème</sup> siècle. Il s'agit d'abord d'un vase soufflé à fond plat que l'on fait ensuite tourner face à l'ouverture d'un four. Ce n'est que lorsque ce nouveau procédé a été inventé que le verre plat a pris son essor [5].

- Le soufflage en manchon :

Produit dans l'Est de la France et en Europe centrale. Ce cylindre de verre obtenu par l'allongement de la paraison cueillie par le verrier et coupé dans le sens de la longueur, puis fendu, ramolli et aplati [6].

## I.2. Définition du verre

Pour la majorité des scientifiques le terme verre est défini quel que soit son processus de fabrication comme tous solides non cristallins qui présente un phénomène de transition vitreuse [7].

L'état physique correspondant est appelé état vitreux [8].

Selon la norme A.S.T.M (C-162-92) (American Society For Testing And Materials) c'est un produit inorganique, coulé à partir d'un état liquide vers un état solide sans cristallisation.

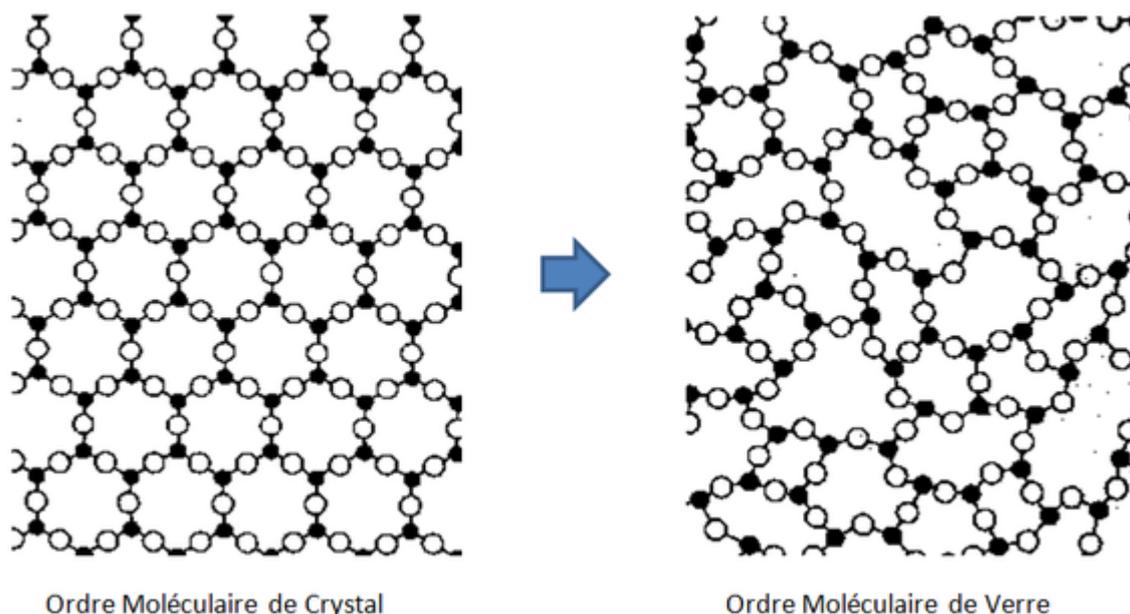
Gustav Tammann [9] définit le verre comme suit :

« L'état vitreux est l'état figé d'un liquide en surfusion, qui se solidifie sans cristalliser »

Le verre est un alliage dur aussi fragile (cassant), transparent au rayonnement visible.

## I.3. L'état vitreux

L'état vitreux est observé dans une matière si ses molécules sont toutes identiques tandis que leur distribution est désordonnée.



**Figure I.1** : Schéma montrant la structure moléculaire du cristal (gauche) et du verre (droite)

C'est le cas du verre où chaque molécule de silice est identique (tétraèdre) mais où l'organisation des unes et des autres est inexistante. Cette fausse organisation se situe entre celle des solides (ordonnée donc cristallisée) et celles des liquides (en mouvement donc amorphe). L'état vitreux est cet état solide amorphe (non cristallisé) caractérisé par la distribution désordonnée des molécules qui conservent néanmoins des distances fixes entre elles [10].

## I.4. Transition vitreuse

### I.4.1. Définition de la température de transition vitreuse $T_g$

La manière classique de produire un verre consiste à refroidir un liquide rapidement pour que la cristallisation n'ait pas le temps de se produire.

L'accroissement continu de la viscosité lorsque la température diminue a pour résultat un figeage progressif du liquide jusqu'à sa solidification finale.

Afin de mieux approcher la notion de transition vitreuse, il est utile de représenter et de suivre l'évolution structurale des trois paramètres thermodynamiques  $V$ ,  $H$  et  $S$ . [11]

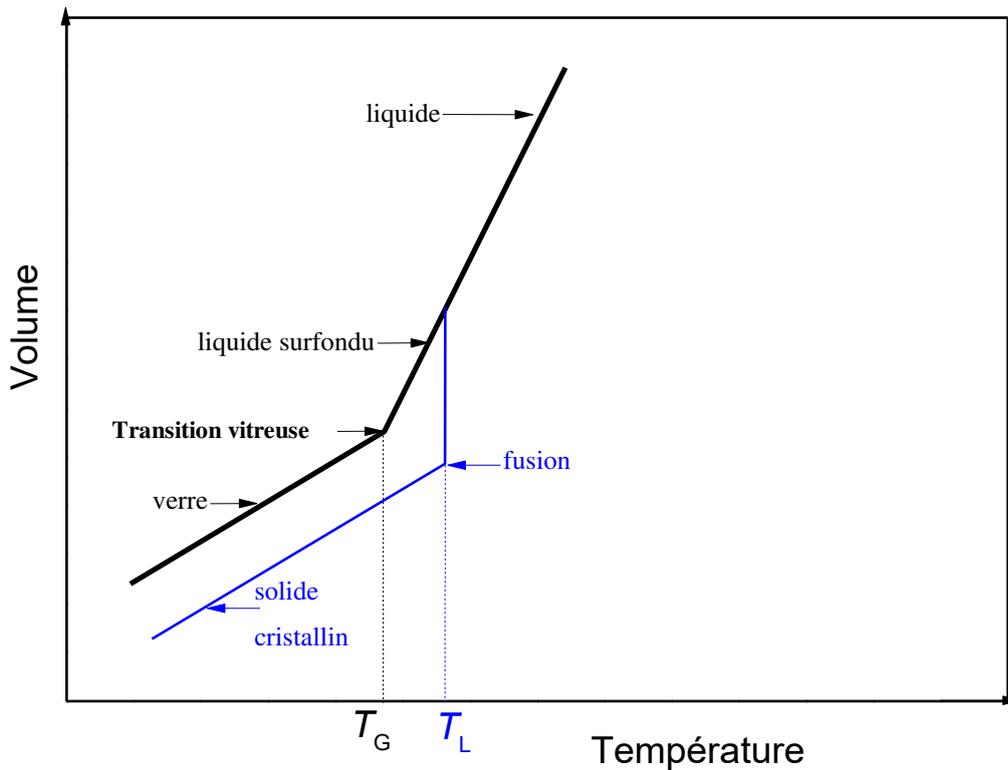


Figure I. 2 : Variation du volume spécifique d'un verre en fonction de la température

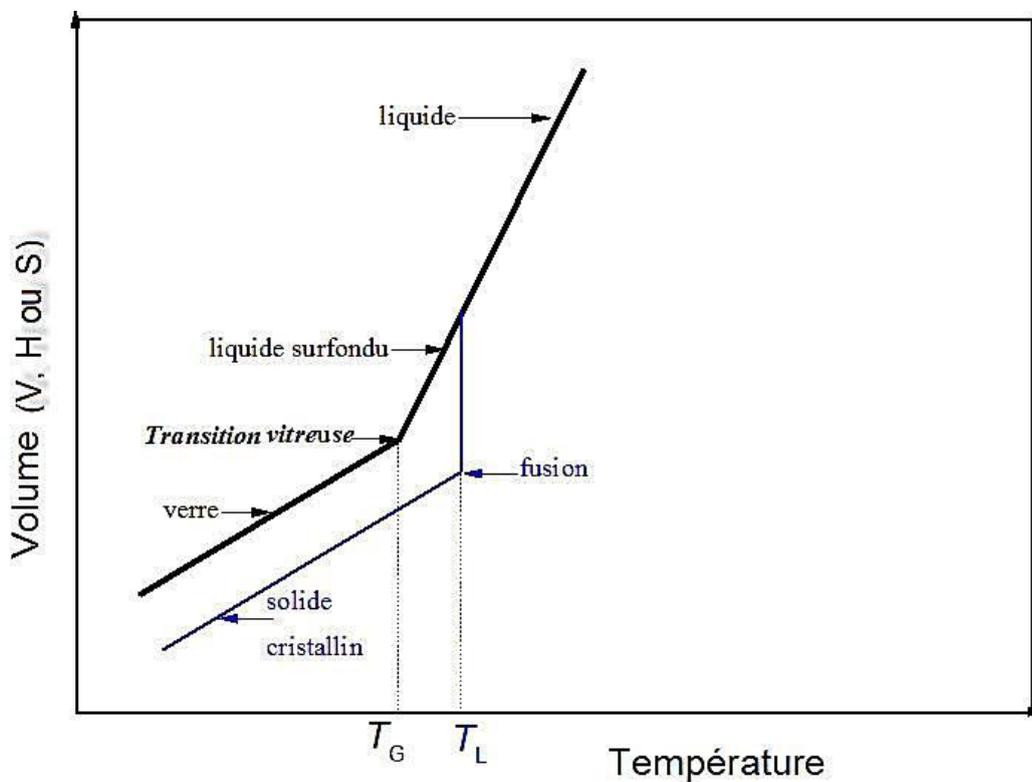


Figure I. 3 : Variation du volume V (H ou S) d'un verre en fonction de la température.

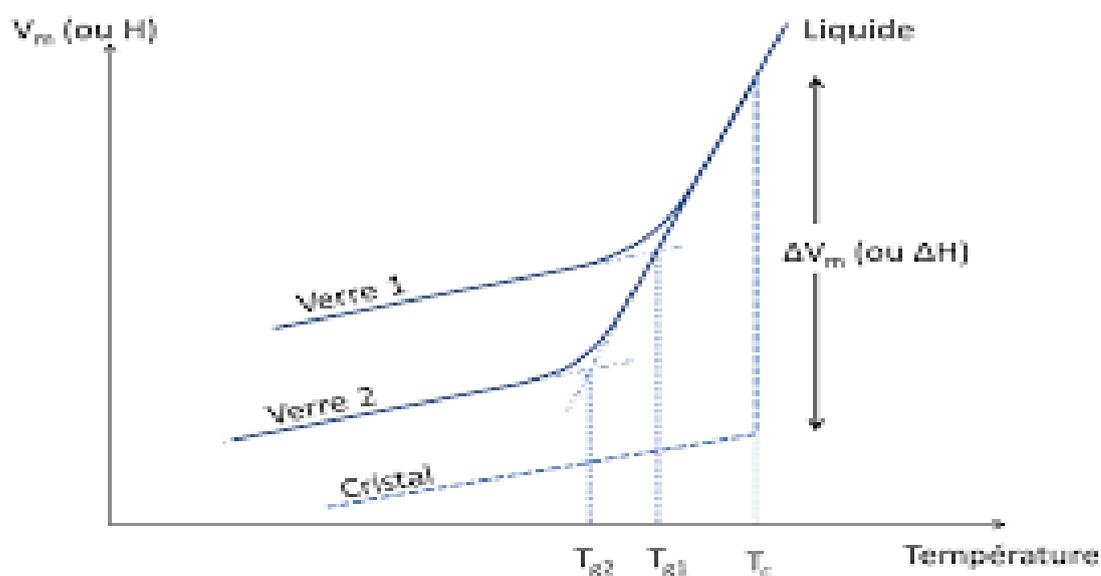
## Chapitre I : Notions de base sur le verre

Les grandeurs représentées (*figures I.2 & I.3*), sensibles à l'évolution structurale, sont les dérivées premières de l'énergie libre du système ; soit le volume spécifique ( $V_s$ ), l'enthalpie ( $H$ ) ou encore l'entropie  $S$ . [12]

Dans la phase haute température, l'état d'équilibre est l'état liquide. Si le refroidissement est suffisamment rapide pour éviter la cristallisation, on obtient un état liquide surfondu dont la viscosité augmente au fur et à mesure que la température diminue.

Quand la viscosité atteint une valeur de l'ordre de  $10^{13}$  à  $10^{14}$  poises, la mobilité atomique devient insuffisante pour que le matériau conserve la structure d'équilibre du liquide surfondu, il y a alors formation d'un verre ou solide vitreux par figeage de la configuration atomique. La température correspondant à ce figeage est appelée  $T_g$  ou température de transition vitreuse ; il s'agit plutôt d'un domaine de transition vitreuse qu'une température; car  $T_g$  n'est pas constante, mais dépend de la vitesse de refroidissement. [13]

### I.4.2. Intervalle de transition



**Figure I. 4 :** Variation de  $T_g$ , en fonction de la vitesse de refroidissement

A pression constante la position du point de transition  $T_g$  n'est pas fixe comme c'est le cas de  $T_f$ , mais varie légèrement avec la vitesse à laquelle on refroidit le liquide. Un refroidissement rapide a pour effet de décaler le coude définissant  $T_g$  dans le sens des températures plus élevées, alors qu'un refroidissement lent déplace  $T_g$  vers des températures plus basses. C'est dans ce sens qu'il est préférable de substituer à  $T_g$  la notion « d'intervalle de transition ou de transformation  $[T_g]$  dont les bornes supérieure et inférieure sont respectivement déterminées par les vitesses de refroidissement les plus élevées et les plus lentes utilisées pour déterminer  $T_g$  [14].

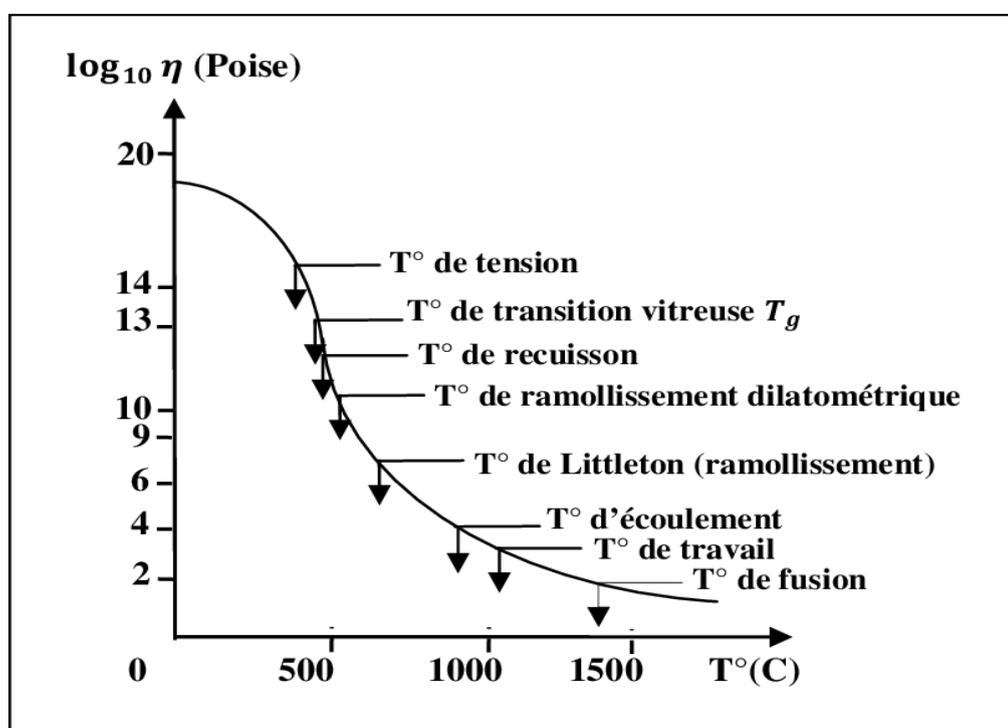
### I.5. La viscosité dans les verres

La propriété probablement la plus importante pour la fabrication et le travail du verre est la viscosité  $\eta$  car de nombreux processus en dépendent. [15]

La viscosité  $\eta$  pourra être définie comme un coefficient qui caractérise le frottement interne dans une substance déterminée

La viscosité dans les verres dépend de leur nature et de leur structure et varie fortement avec la température. Plus la température est élevée, plus le nombre de liaisons rompues au sein de la structure vitreuse est important et plus la viscosité du verre devient faible.

Inversement lors d'un refroidissement des liaisons se forment d'où une augmentation de la viscosité avec une diminution de la température.



**Figure I. 5 :** Variation de la viscosité d'un verre silico-sodo-calcique en fonction de la Température.

Quelle que soit la nature du verre à obtenir, quel que soit le procédé de travail mis en œuvre, qu'il s'agisse de façonnage manuel ou de confection automatique, d'étirage, de laminage, la viscosité joue un rôle essentiel. [16]

- la fusion, elle ralentit les réactions,
- l'affinage, elle freine l'élimination des bulles qui se sont dégagées au cours de la fonte,

- façonnage, elle s'oppose aux déformations que l'on imprime au verre et conserve celle acquises,
- recuit, elle contrarie le relâchement des tensions internes qui ont pris naissance par refroidissement brusque ou irrégulier au cours du travail et qu'il importe de faire disparaître pour assurer aux pièces leur solidité.

### I.6. Constituants d'un verre

Trois grandes catégories de constituants peuvent intervenir dans la composition d'un verre

#### I.6.1. Les formateurs de réseau

Ce sont des composés ayant des caractéristiques covalentes, tels qu'oxydes ou sulfures de silicium, de bore, de phosphore ou de germanium...

Généralement ils peuvent facilement donner les verres eux-mêmes

Les sables utilisés dans l'industrie verrière contiennent plus de 99% de  $\text{SiO}_2$  avec un taux d'impuretés inférieur à 0.2%. [17]

#### I.6.2. Modificateurs de réseau

Ce sont des composés qui ont un caractère ionique marqué, on peut citer en particulier les oxydes ou les sulfures alcalins, alcalinoterreux ou de métaux de transition. Ils sont incapables de former par eux-mêmes un réseau vitreux mais sont susceptibles de réagir avec les formateurs et de s'incorporer dans leur réseau en le modifiant considérablement [18].

#### I.6.3. Composés intermédiaires

Ils peuvent être introduits dans le réseau vitreux s'ils contiennent déjà un formateur et un modificateur et uniquement à cette condition. [19]

### I.7. Structure du verre

Le verre est un solide amorphe. Sa structure dérive de celle de la silice. La distance moyenne entre les atomes de silice vitreuse ( $\text{SiO}_2$ ) est d'environ  $3,6 \text{ \AA}$  et il n'y a pas d'ordre entre les atomes à des distances supérieures à  $10 \text{ \AA}$ . [20]

L'obtention d'un solide amorphe consiste à un refroidissement rapide de l'état liquide sans cristallisation. Dans des travaux récents sur la structure du verre, les chercheurs ont classé la structure du verre en quatre classes d'arrangement structural. [21]

## Chapitre I : Notions de base sur le verre

---

La première classe c'est l'atome central (Si) et les atomes voisins immédiats en formant les sommets des tétraèdres.

La classe suivante c'est l'organisation des groupes structuraux autour du groupe central ensemble des unités I autour de l'unité centrale.

La troisième est intermédiaire caractérisée par des arrangements ordonnés de plusieurs atomes distants à partir de l'atome central.

La quatrième est la structure en longue distance caractérisée par des fluctuations de densité et de composition.

Le réseau cristallin du dioxyde de silicium est détruit en remplaçant les cations formant des oxydes (Si) par des cations d'oxydes (Na, Ca, K), ouvrant ainsi le réseau et brisant sa périodicité.

Ces éléments ne font pas partie du réseau vitreux, mais ils aident à sa dépolymérisation. Ces éléments sont insérés entre les tétraèdres et produisent des oxygènes non pontants.

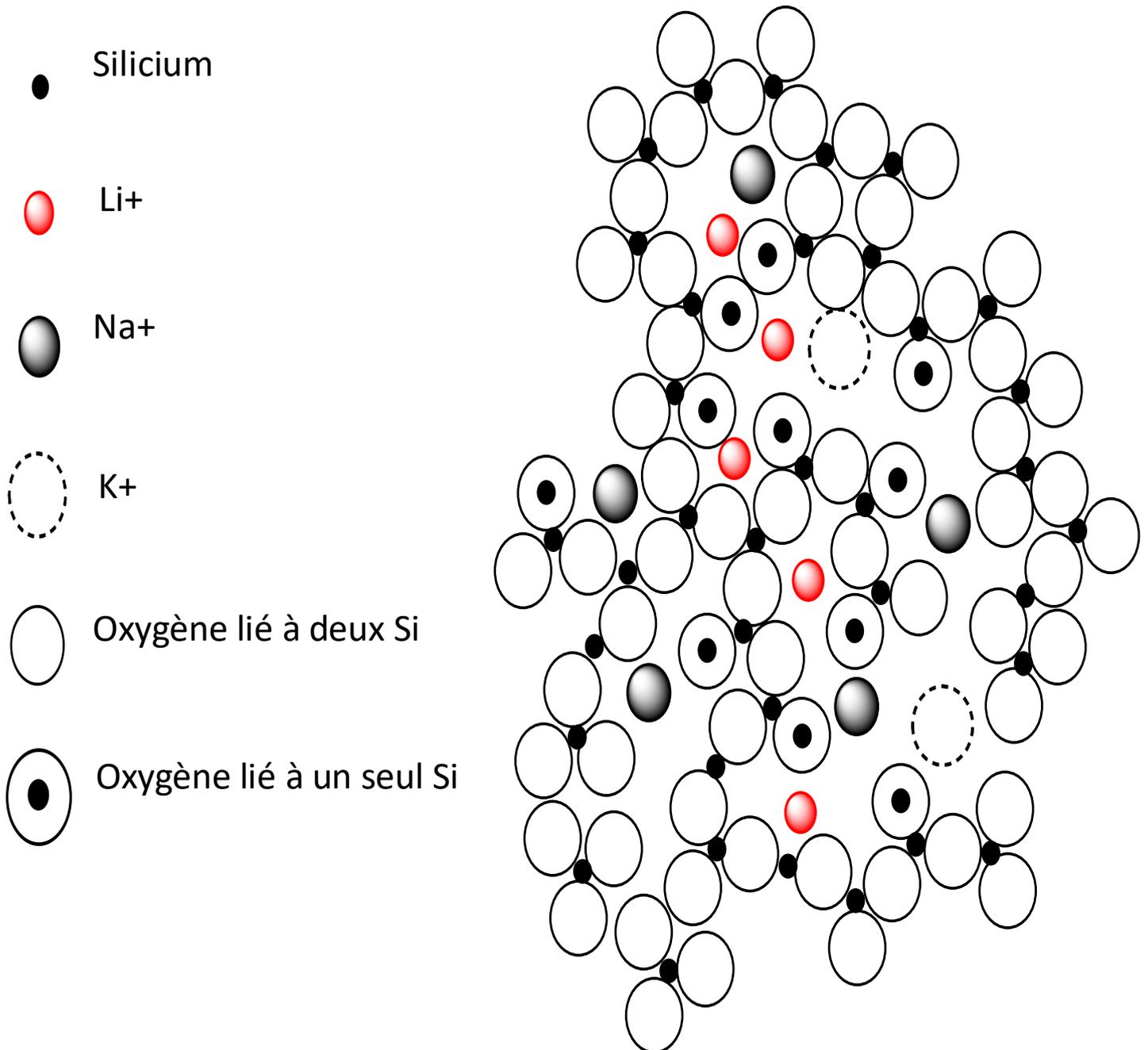


Figure I. 6 : Représentation schématique plane du réseau d'un verre de silicate alcalin [22]

### I.8. Propriétés du verre

Le verre est la seule matière minérale solide que l'on puisse produire à des dimensions et sous formes quelconques tout en conservant sa transparence.

#### I.8.1. Propriétés physiques

➤ **La transparence :**

Le verre peut être opaque ou opalescent.

➤ **Dureté :**

La dureté d'un matériau est définie comme la [résistance mécanique](#) qu'un matériau oppose à la pénétration d'un poinçon.

Par exemple une bille en acier trempé (dureté brinell) ou une pyramide en diamant (dureté Vickers) Vis-à-vis la dureté le verre se divise en deux grands types :

Les verres durs : des verres à faibles coefficients de dilatation thermique qui se ramollissent à température élevée.

Les verres tendres à coefficient de dilatation élevé qui se ramollissent à une température relativement basse.

➤ **La densité :**

Elle dépend des composants, elle est d'environ  $2.5\text{g/cm}^3$ . Cela signifie qu'un mètre cube pèse environ deux tonnes et demie ou qu'une feuille d'un mètre carré et d'un millimètre d'épaisseur pèse 2.5kg.

La résistance d'élasticité : la cassure du verre est liée à sa flexion et à sa résistance au choc. Il casse là où le métal se tord. Contrairement sa résistance à la compression est importante : il faut une pression de 10 tonnes pour briser un centimètre cube de verre ; La vitesse maximale de fissuration du verre  $V_m$  est définie par l'expression suivante [9] :

$$V_m = 0.38 \sqrt{E/\rho} \longrightarrow (1)$$

**Avec :**

**E** : module de Young

**$\rho$**  : la masse volumique

L'imputrescibilité : il ne se putréfie pas

L'imperméabilité : elle est extrêmement grande mais le verre reste poreux pour certains liquides

### I.8.2 Les propriétés thermiques

#### ➤ La dilatation :

Elle s'exprime par un coefficient mesurant l'allongement par unité de longueur pour une variation de 1°C.

Coefficient de dilatation linéaire du verre :  $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  Ainsi un vitrage de 2 m de longueur s'échauffant de 30°C, s'allongera de 0.54 mm

Le verre se brise s'il subit un brusque changement de température car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas au même temps [23].

#### ➤ La chaleur spécifique :

La quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un kelvin la température de l'unité de masse d'une substance.

Coefficient de dilatation linéaire du verre :  $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  signifie qu'une plaque de verre flotte d'un mètre de long soumise à une augmentation de température de 100 °C se dilate de 0.9 mm . Pour l'aluminium, la valeur analogue serait de 2.4 mm, ce coefficient varie selon la composition [24].

#### ➤ La conductivité :

Le verre est un mauvais conducteur (environ 500 fois moins que le cuivre), c'est un isolant électrique et aussi acoustique ceci ce n'est pas le cas à chaud car il devient conducteur a 250 °C.

### I.8.3 Propriétés chimiques

Le verre est un matériau présentant une très grande inertie chimique. Il n'est attaqué que par l'acide fluorhydrique ou quelques produits fortement alcalins.

Les eaux de ruissellement de béton sont de ces points de vue particulièrement dommageables pour les vitrages.

Le feu n'a aucune action chimique sur le verre.

Il est incombustible.

Il n'est pas décomposé.

Il n'est pas oxydé.

### I.9. Les différents types de verres industriels

Les emplois du verre sont très variés, de l'utilisation quotidienne à la haute technologie. Ils donnent lieu à une production très importante. La société MFG couvre 80% des besoins du marché Algérien en produits verriers avec une production de 600 tonnes par jours.

### I.9.1. Verres plats

Les vitres étaient jadis fabriquées par étirage (procédés Pittsburgh), et les glaces par laminage, suivi d'un travail mécanique. Actuellement, on prépare les verres de vitrage par flottage sur un bain d'étain (procédés Pilkington).

Le verre s'aplatit sur ce bain et peut présenter toutes les épaisseurs comprises entre 3 et 18 mm.

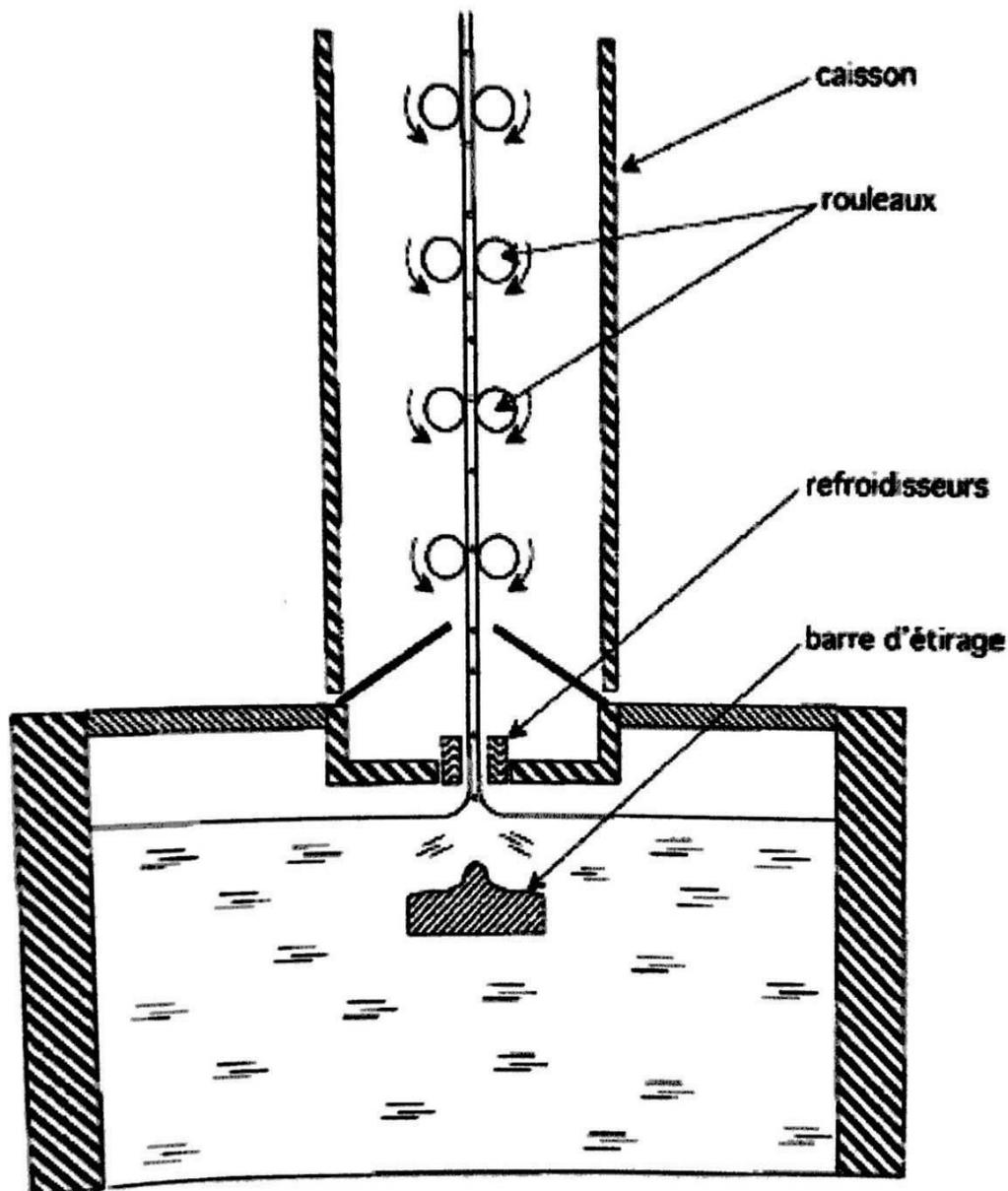
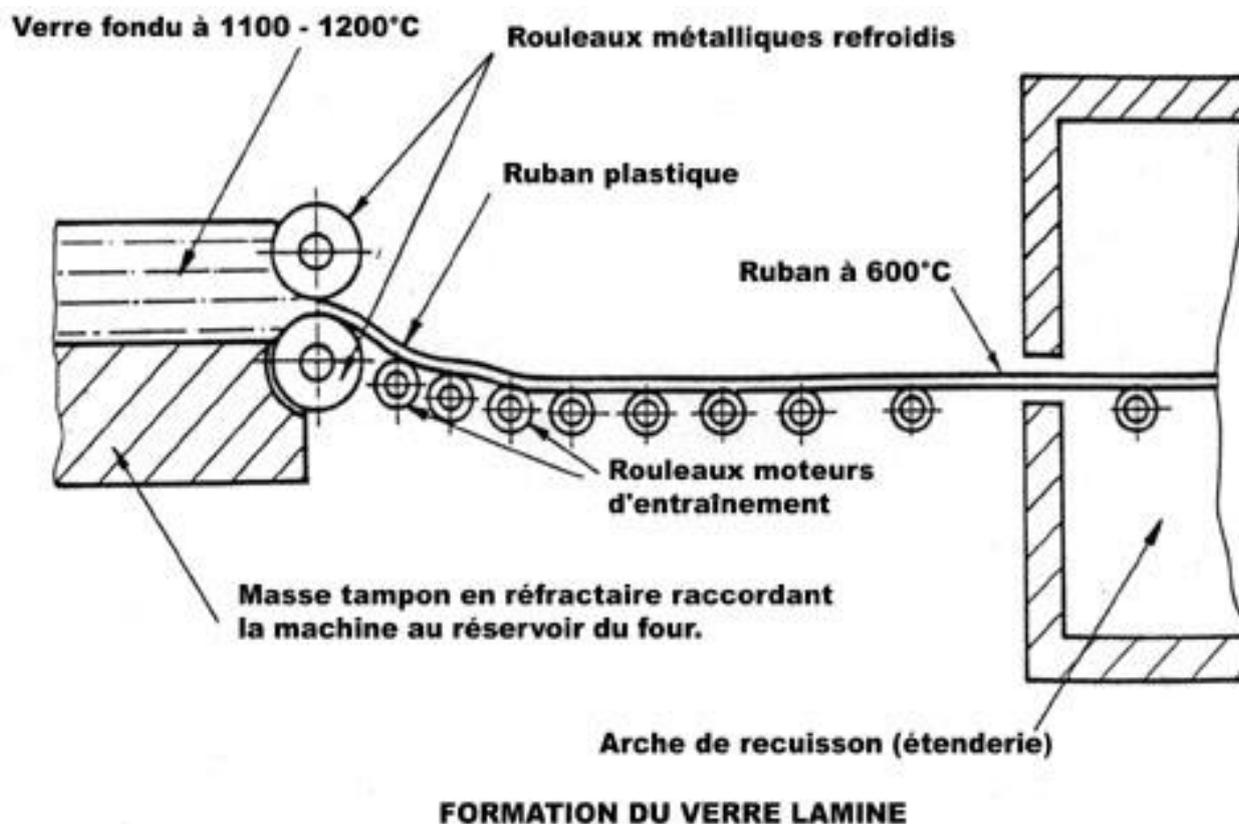


Figure I. 7 : Schéma de fonctionnement du procédé Pittsburgh [13].



**Figure I. 8 :** Schéma de fonctionnement du procédé de laminage

### I.9.2. Verres creux

Les verres creux sont utilisés pour fabriquer les bouteilles, les flacons, les tubes, les ampoules, les briques et les pavés. La composition du verre est différente suivant le produit fabriqué. Pour un contenant de produits alimentaires, on emploie un verre sodico-calcique.

Une quantité déterminée de verre fondu ou « paraison » est introduite dans un moule et pressée vers 400-450°C. Les moules sont en acier spécial et leurs surfaces souvent chromées. Les presses à main permettent de fabriquer jusqu'à 300 pièces/heure et les presses automatiques (comportent une série de moules) jusqu'à 1000 pièces/heure,

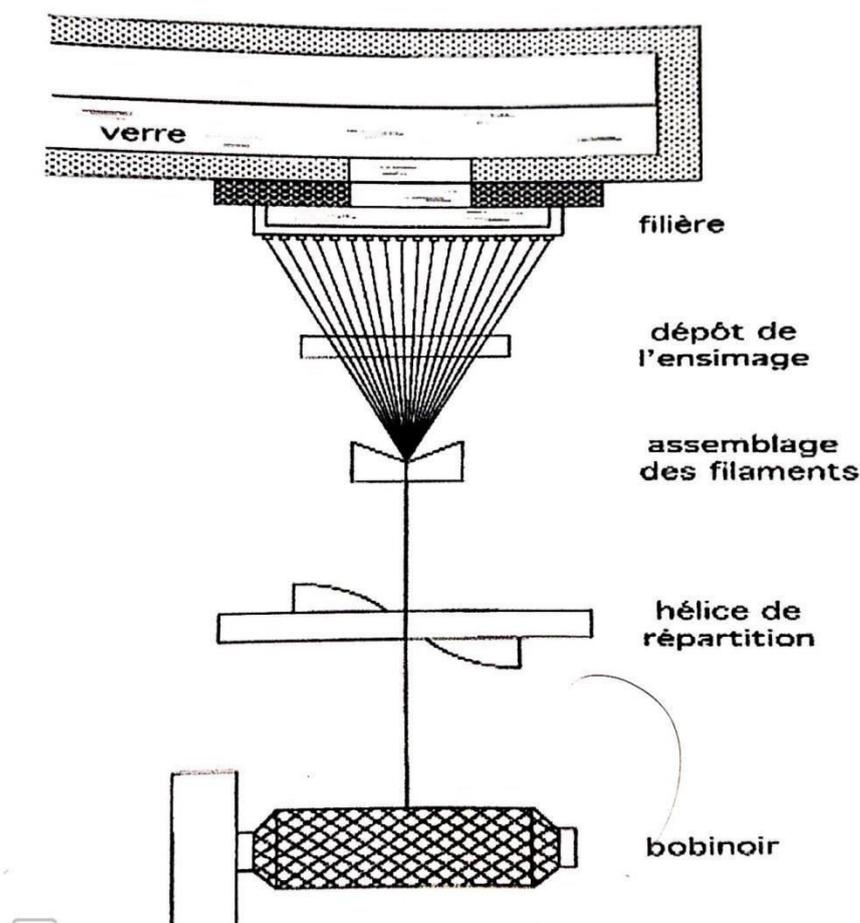
Le procédé primitif de soufflage à la bouche, encore pratiqué dans la verrerie d'art ou scientifique a été mécanisé pour augmenter les rendements [25].

### I.9.3. Fibres de verres

Ils sont obtenus par l'étirage verre fondu jusqu'à ce qu'il présente un diamètre compris entre 0,5 et 15  $\mu\text{m}$ . Il est possible de fabriquer des fils longs, continus et multifilaires aussi bien que des fibres courtes de 25 à 30 cm de long. Tissées dans certains textiles, les fibres de verre constituent d'excellentes étoffes et de très bons matériaux d'ameublement grâce à leur stabilité chimique, leur solidité et leur résistance au feu et à l'eau [26].

Les fibres de verre seules, ou associées à des résines, forment d'excellents isolants électriques. En imprégnant les fibres de verre de plastique, on obtient une fibre de verre mixte qui allie la solidité et l'inertie du verre à la résistance aux chocs du plastique.

Parmi les procédés de fabrication des fibres de verres il y a l'étirage mécanique à grande vitesse, la vitesse déterminant le diamètre des fibres qui est compris entre 1 et 8  $\mu\text{m}$ . Ces fibres sont destinées à l'ameublement, au renforcement de matière plastique ou du caoutchouc, du plâtre, du papier, à l'isolement électrique ou à la fabrication de tissus industriels [13].



**Figure I. 9** : Représentation schématique de fabrication de fibres de verres par étirage mécanique [13].

## **I.10. Conclusion**

Le verre est donc bien présent en grande quantité dans notre quotidien mais aussi dans divers domaines scientifique et technologique. Il est composé dans la plupart des cas d'oxyde de silicium en majorité, mais il existe d'autres types de verres à partir d'espèces chimiques différentes. La fabrication du verre nécessite des fours de très grande puissance, pouvant parfois atteindre 1500 °C afin de permettre aux mélanges de rentrer en fusion.

Le verre possède des propriétés physico-chimiques très particulières lui permettant entre autre de ne pas réagir avec son milieu d'utilisation ce qui le rend fortement utile en verrerie de laboratoire et même dans le domaine nucléaire.

Le verre est aussi un matériau essentiel au développement de la science et de la construction, au même titre que les matériaux composites (béton), les bois, et les métaux. De plus le verre est un matériau recyclable et par conséquent, il est réutilisable comme calcin dans la fabrication des nouveaux verres.

# Chapitre II

## Les étapes de fabrication du verre plat

### II.1. Définition du verre flot

Le verre float (float glass) est un type de verre fabriqué par flottage sur un lit de métal fondu, (généralement l'étain), le plomb et d'autres alliages à bas point de fusion ont été utilisés dans le passé. Cette méthode donne à la feuille du verre une épaisseur uniforme et une surface très plane. [27]

La plupart de verre float est de Silicate Sodo-Calcique, mais il y a d'autres types de verre comme le borosilicate et le panneau de verre plat d'affichage sont également produits en utilisant le procédé de verre float. Le processus de verre flotté est également connu comme le procédé Pilkington, nommé d'après le Britanniques fabricant Sir Alastair Pilkington qui a développé la technique dans les années 1950. [28]

Le verre float est fabriqué dans un long flux continu qui produit un ruban de verre illimité et ininterrompu, qui peut atteindre chaque jour 30 kilomètres de long, en fonction de l'épaisseur du verre et de la capacité de l'installation.

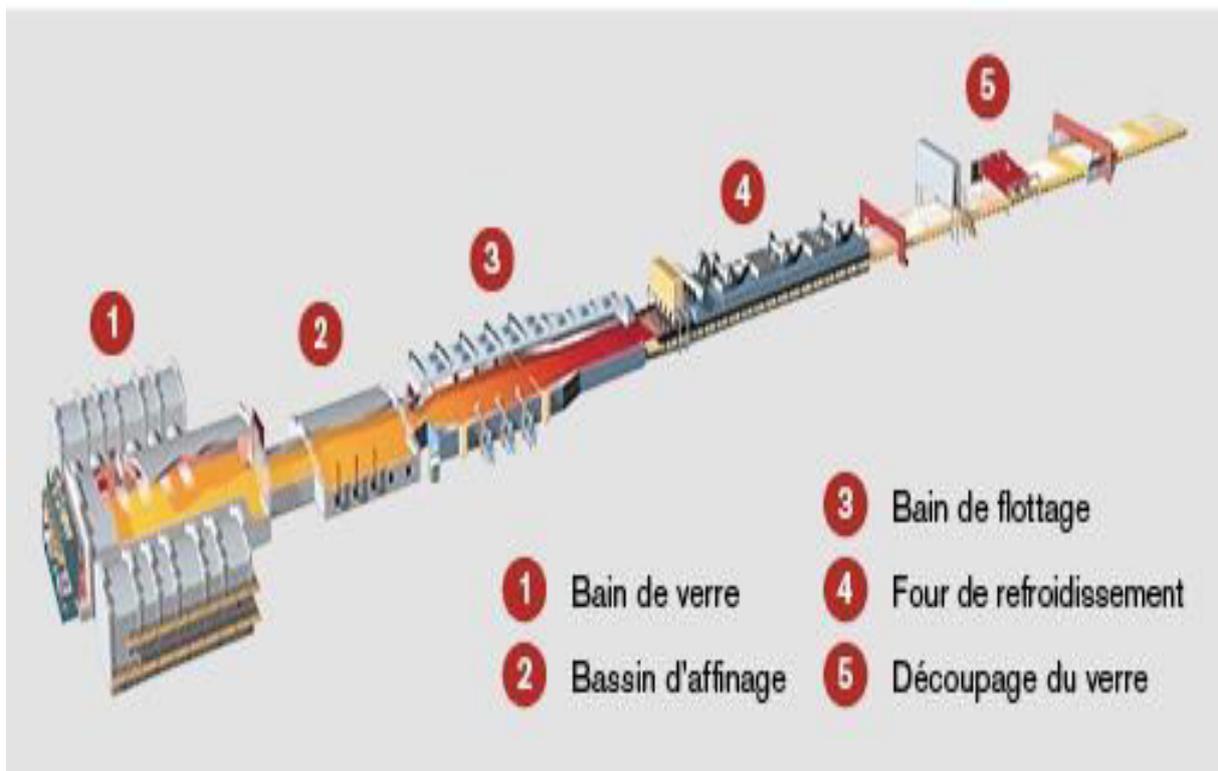


Figure II. 1 : Schéma de processus de fabrication du verre float

### II.2. Composition chimique du verre silicate sodo-calcique

La principale matière première utilisée pour la fabrication du verre float est le sable siliceux, qui est présent en quantité excédentaire dans la nature. Les générations futures disposeront elles aussi de quantités suffisantes. Il faut également de la soude, de la dolomie (chaux) et d'autres matériaux bruts en petite quantité. Pour améliorer le processus de fusion, près de 20 % de chutes de verre propres sont ajoutés (le calcin).

#### II.2.1. Le sable siliceux ( $\text{SiO}_2$ )

L'élément de base du verre est le sable, ou plus exactement la silice fondue. D'ailleurs, on trouve du verre "naturel" qui se forme lors d'éruptions volcaniques. L'obsidienne, une roche noire et coupante, en est un exemple bien connu. Le problème, c'est que la silice fond à une température très élevée (1 710°C environ). Pour faire baisser cette température, on ajoute donc des "fondants", comme la soude, la potasse ou la chaux.

#### II.2.2. Carbonate de soude ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )

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 :  $\text{O}-\text{Si}-\text{O}$  [27].

#### II. 2.3. La dolomie

La dolomie est une roche carbonatée contenant à la fois de la chaux et de la magnésie dans des proportions sensiblement égales.

L'oxyde de magnésium ( $\text{MgO}$ ) est mis essentiellement afin d'éviter 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  $\text{CaO}$ .

#### II. 2.4. Calcaire ( $\text{CaCO}_3$ )

Le calcaire est riche a plus de 58% en calcium, l'ajout de  $\text{CaO}$  dans le verre augmente sa résistance à l'attaque chimique, sa densité, son coefficient de dilatation thermique ainsi que son indice de réfraction par contre il décroît aussi sa résistance mécanique. La présence de  $\text{CaO}$  conduit à un abaissement de la viscosité de verre.

### II.2.5. Feldspath [(K,Na) AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>]

C'est une matière première difficilement fusible, le feldspath est ajouté afin d'améliorer la résistance chimique et augmenter la viscosité à basse température.

Lorsque on ajoute l'oxyde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dans un verre contenant des alcalins, le Al<sup>3+</sup> va avoir une possibilité de se substituer à Si<sup>4+</sup> dans le réseau si à son voisinage se trouve un Na<sup>+</sup> qui compose la charge négative excédentaire. Chaque Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ajouté fait disparaître la paire d'oxygène non-pontant.

### II.2.6. Sulfate de soude

Le sulfate de sodium est un courant de composé chimique formé d'un ion sulfate et de deux ions sodium. Une fois sèche, il prend l'aspect d'un solide cristallin blanc avec la formule chimique Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, il est également utilisé pour la fabrication des détergents.

Il est aussi utilisé dans la fabrication du verre comme un agent affinant dans le mélange vitrifiable.

### II.2.7. Le charbon

Utilisé dans le mélange vitrifiable comme un réducteur d'oxygène libéré lors de la décomposition de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> selon cette réaction :



### II.2.8. Oxyde de fer

L'oxyde de fer possède d'une bonne conductivité thermique il a alors un rôle d'assurer la stabilité de régime thermique dans le four de fusion.

L'oxyde de fer est considéré aussi comme un agent colorant, il donne au verre sa couleur verdâtre, C'est un régulateur de la transmission lumineuse du verre.

### II.2.9. Le calcin

C'est du débris de verre ajouté aux matières premières mises en œuvre pour fabriquer le verre.

Le calcin, parfois appelé groisil, son emploi à une grande importance car la fusion de ce dernier consomme moins d'énergie que le mélange vitrifiable.

C'est la matière première la plus importante en volume devant le sable et la seconde en cout derrière le carbonate.

### II.3. La fusion du verre silicaté sodocalcique

C'est dans le four de fusion que se réalise le processus d'élaboration du verre à partir du mélange vitrifiable ; celui-ci est obtenu par un mélange intime des matières premières préalablement dosées auquel on ajoute au minimum de verre broyé appelé calcin ou groisil. Cette adjonction de verre broyé est indispensable pour obtenir une qualité de verre correcte.

Les matières premières (sont appelées mélanges vitrifiables), pesées et mélangées et introduites dans le four de fusion, la fusion a lieu température 1550 °C.

#### II .3.1. Fours électriques

Le principe de chauffage de ces fours est très différent de celui des fours à flammes, car l'énergie thermique y est apportée dans la masse du verre en fusion, au lieu d'être transmise à la surface du bain de verre dans les fours à flammes [31].

Des électrodes en molybdène ou en oxyde d'étain 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 qui maintient la température nécessaire à tous les phénomènes de formation du verre.

Les fours électriques sont principalement utilisés pour les petites productions telles que la fibre de verre, et il convient de noter que le chauffage électrique est parfois utilisé comme accessoire supplémentaire dans des fours à flammes.

#### II .3.2. Fours à bruleurs transversaux

Une enceinte chauffée où s'opère la transformation du mélange vitrifiable en verre utilisant des systèmes de récupération de la chaleur par régénération. Les orifices d'arrivée d'air ou d'évacuation des fumées sont situés sur les côtés du four.

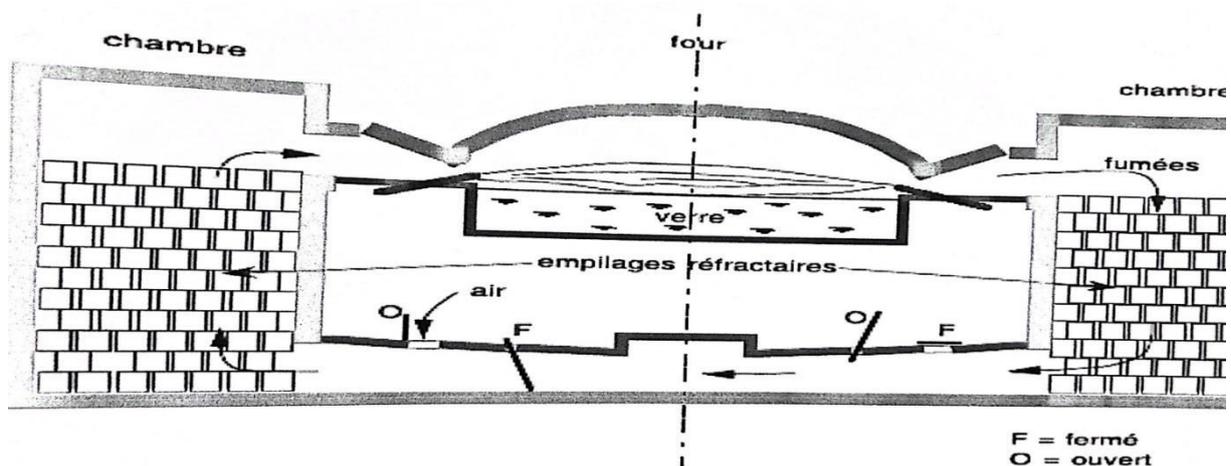


Figure II.2 : Four à bruleurs transversaux (coupe transversale)

## Chapitre II : Etapes de fabrication du verre plat

Les fumées sont utilisées pour préchauffer l'air de combustion grâce à leur passage dans une chambre contenant des briques réfractaires, qui se réchauffent à leur contact. Les brûleurs fonctionnent d'une façon alternative, après chaque vingt (20) minute le système est inversé et l'air de combustion passe à travers la chambre préalablement chauffée.

Les parois des cuves de fusion sont constituées par des blocs verticaux évitant tout joint horizontal qui constitue une amorce de corrosion (consommation progressive du réfractaire). Dans ce type de four, l'usure par corrosion est prépondérante au niveau de la flottaison où il y a contact avec la composition non fondue (usure en coup de sabre).

On peut également éviter ou ralentir temporairement cette corrosion en faisant abaisser le niveau de matière première dans la cuve de four, et peut être que c'est l'avantage principal que représente le four à brûleurs transversaux par rapport aux fours électriques.

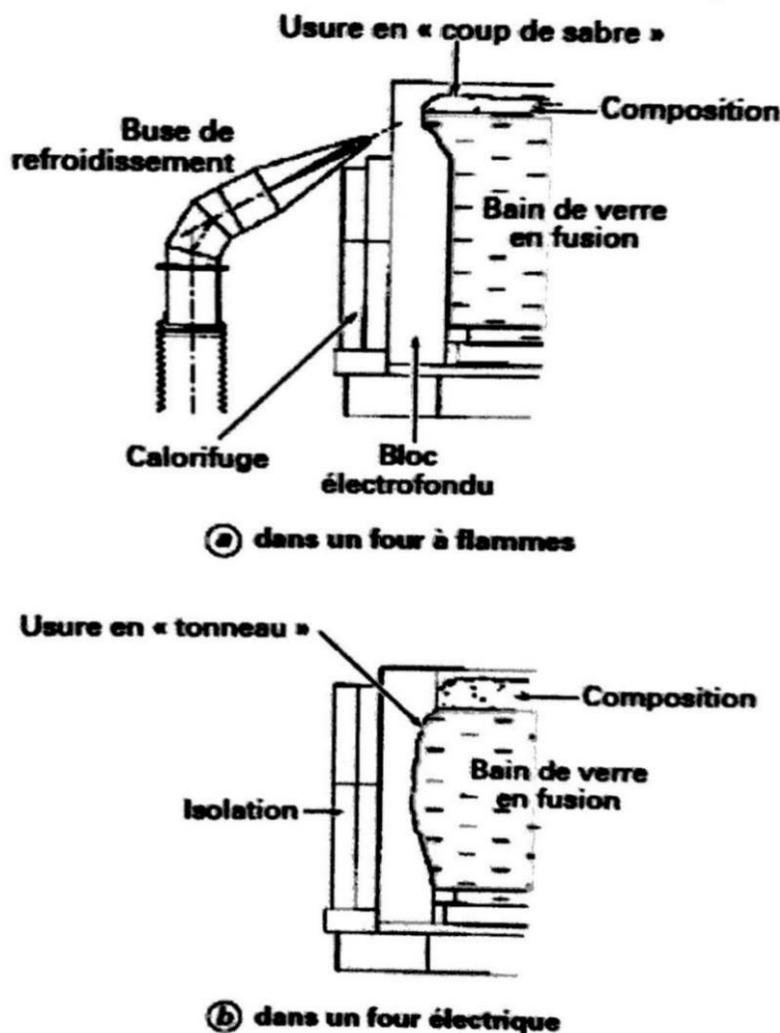


Figure II. 3 : Usure des blocs de parois du four.

### II .4. Les différents ateliers de la ligne

#### II .4.1. Atelier de Fusion

##### II .4.1.1. L'élaboration

Au cours de la fusion, le mélange vitrifiable est transformé en une masse liquide dans laquelle se dissolvent même les particules les moins miscibles, c'est à dire les plus riches en  $\text{SiO}_2$  et pauvre en  $\text{Na}_2\text{O}$ .

Le carbonate de sodium fond, lorsqu'il est seul à une température de  $850^\circ\text{C}$ , mais à des températures de  $775^\circ$  il commence à réagir avec les grains de sable.

Chaque grain de sable dégage des bulles de dioxyde de carbone dans un liquide qui devient de plus en plus visqueux à mesure que le carbone transforme en silicate.

Quant aux grains de calcaire, ils ne fondent pas mais perdent leur  $\text{CO}_2$  en se transformant en chaux.

La dolomie se décompose de manière analogue, puis  $\text{CaO}$  et  $\text{MgO}$  se dissolvent dans la phase liquide dont la composition devient très proche de la composition finale.

On appelle une chaleur de fusion, la chaleur à fournir pour obtenir un kilogramme de verre à partir du mélange vitrifiable. Pour la composition sodocalcique, elle vaut environ  $0.73\text{ kWh/kg}$ .



Figure II. 4: Four de fusion

### II .4.1.2. L'affinage

Dans le mélange vitrifiable en fusion, il est nécessaire d'expulser les bulles de gaz provenant des différentes réactions chimiques mais également de l'air situé entre les matières premières et de l'évaporation de l'eau.

Cette étape nécessite la présence d'affinant dans le mélange de départ, une élévation de la température (pour diminuer la viscosité du verre fondu) et parfois une agitation mécanique ou l'insufflation d'air.

### II .4.1.3. La Gorge

C'est une zone intermédiaire entre l'affinage et le conditionnement. Elle est considérée comme un barrage pour stopper les impuretés qui flottent sur la surface du verre grâce à des barres en acier introduit à la sortie de cette zone. Elle permet aussi de régler le débit de verre. Cette zone contient environ sept malaxeurs qui assurent l'homogénéisation du liquide.

### II .4.1.4. Le conditionnement thermique

Sert à abaisser la température du verre, car au début de l'opération de mise en forme, la viscosité du liquide doit être au moins dix fois plus élevée que pendant l'affinage.

En pratique, on le laisse se refroidir et pour éviter les forts gradients de viscosité, on fait en sorte que ce refroidissement soit très lent. Autrefois on laissait le pot contenant le verre dans le four que l'on cessait d'alimenter en combustible.

Parmi les bénéfices de cette opération est la stabilité de régime thermique dans le four. Et donc la diminution des défauts et l'augmentation de rendement.

### II .4.2. Bain d'étain

C'est un système étanche avec une atmosphère contrôlée composée d'azote et d'hydrogène. Il se compose d'une structure en acier, d'une enveloppe métallique supérieure, d'une enveloppe métallique inférieure protégée de l'étain par des réfractaires spéciaux et de systèmes de contrôle de la température du ruban de verre et du formage. Le bain mesure environ 60 m de long sur 8 m de large [33], avec une vitesse de défilement pouvant atteindre jusqu'à 25 m/min. Il contient près de 200 tonnes d'étain pur, fondu à une température moyenne de 800 ° C.

Des résistances électriques, regroupées en zones de chauffage, permettent une régulation fine de la température du verre qui est progressivement réduite.

### II .4.3. Etenderie

Après le bain d'étain, le ruban de verre passe dans un couloir de refroidissement appelé Etenderie dont la longueur dépasse 114,5 mètres. Il y est refroidi d'environ 600 à 60°C.

Ce refroidissement lent et contrôlé évite toute formation de tensions internes. C'est un élément important dont dépend la qualité du traitement ultérieur.

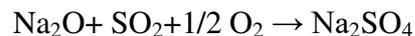
Le four du recuisson (Etenderie) est divisé en deux zones, chaque zone est constituée de plusieurs sections.

- La zone isolante (A0, A. B1, B2, C): le mode de refroidissement utilisé dans cette zone est le processus de radiation thermique, il est assuré au moyen des tubes disposés tout au long de la zone.
- La zone de refroidissement (D1, D2, E, F1, F2, F3): le processus de refroidissement utilisé est celui de la convection forcée.

Des résistances et des ventilateurs permettent un contrôle précis de la température dans le sens longitudinal et transversal du ruban :

- Les résistances électriques sont installées dans les bords des deux côtés de l'étenderie.
- La ventilation est assurée par 11 ventilateurs :
  - 6 ventilateurs dans la zone isolante (deux dans chaque section).
  - 5 ventilateurs dans la zone de refroidissement (un dans chaque section)

Pendant le temps de résidence du verre dans l'étenderie, du SO<sub>2</sub>, est vaporisé sur la sous-surface du ruban :



Ce traitement sert à protéger le verre pendant le contact avec les rouleaux et augmenter la durabilité du verre en milieu acide ou neutre.



**Figure II. 5** : Etenderie

### II .4.4. Découpe du verre flot

La dernière section de la ligne de production est appelée « bout froide ». Elle comprend le contrôle qualité et la découpe.

Le ruban de verre est contrôlé en continu à l'aide de rayons laser afin de détecter la plus petite imperfection car il est rare de pouvoir détecter à l'œil nu les zones qui ne répondent pas aux exigences de qualité.



**Figure II. 6** : Découpe de verre

## Chapitre II : Etapes de fabrication du verre plat

Le verre est ensuite débité et empilé en plaque standard de 6000 x 3210 mm. Les traces laissées par les Top Rolls au niveau des bords sont coupés.



Figure II. 7 : Enlèvement des bords du ruban

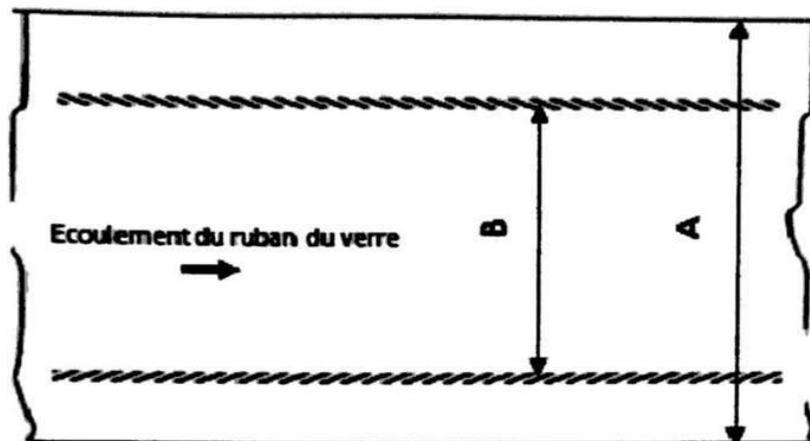


Figure II. 8 : Schéma d'enlèvement des bords du ruban

Avec :

A : largeur brute

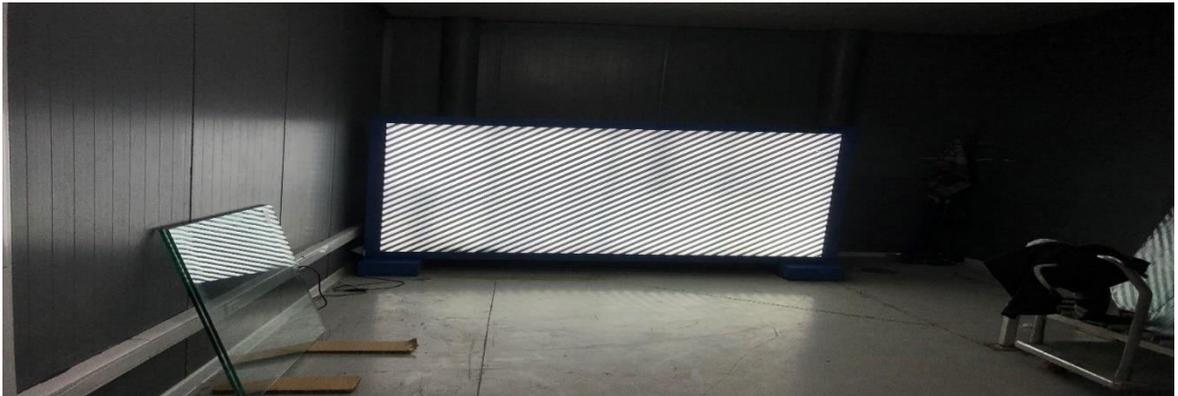
B : largeur du produit fini

La différence de la largeur A et B sera concassé et recyclée .

### II .4.5. Le contrôle qualité

On y effectue les différents tests afin de détecter, classer et dimensionner les différents défauts, on vérifie ainsi la conformité du verre aux normes de consommation .au niveau de MFG, on effectue les tests suivants :

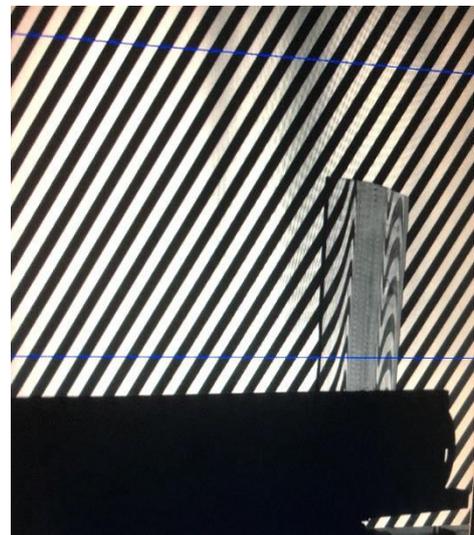
1. **Le test zébra** : pour déterminer l'angle de déformation optique (la norme internationale est de  $45^\circ$ ).



**Figure II. 9** : Test zébra



**Figure II. 10** : Verre sans déformation



**Figure II .11:** Verre déformé

2. **Le test de la lumière latérale** : l'échantillon est latéralement traversé par une lumière blanche, ça permet de bien visualiser les défauts.

3. **Le test de pupitre lumineux** : la surface de l'échantillon est exposée à la lumière blanche afin de localiser les défauts.



**Figure II. 12 : Le pupitre lumineux**

Pour une vérification approfondie, une examination de l'échantillon du verre est effectuée à l'aide de microscope optique.

Des essais de découpage manuel sont effectués pour contrôler le comportement du verre vis-à-vis l'outil coupant.

### II.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a entamé les étapes de fabrication du verre float. Ce procédé float est devenu donc la norme des années 1960 , cette technique consiste à verser un ruban de verre fondu depuis le four et à le faire flotter sur un bain d'étain fondu afin de produire une surface parfaitement plane sans défauts dont l'épaisseur et la viscosité sont uniformes La ligne mesure 500m au totale. Tout commence par l'atelier de composition, plusieurs matières premières entre dans la composition du verre, ce mélange et ensuite fondus dans un four à 1500°C pour éliminer toutes les bulles et les impuretés.

Le verre fondu provenant du four s'écoule a la surface d'un bain d'étain fondu sous une atmosphère contrôlée, le verre se ré pond sur l'étain formant un ruban d'épaisseur et de viscosité uniforme à la fin du procédé float le verre se refroidi et devient suffisamment solide pour être soulevé du bain d'étain vers l'étenderie , cette dernier est un environnement hermétique rempli d'air ou le verre est refroidi pour évacuer toutes contraintes internes et lui donner ses propriétés de verre solide aussi appelé verre recuit , une fois refroidi le ruban et automatiquement découpé en plaque.

L'épaisseur du verre et l'absence des défauts sont contrôlées par un système de détection laser en ligne. La plaque de verre est soulevée à l'aide de ventouse puis une fine couche de poudre est diffusée sur les surfaces entre les plaques afin d'éviter les rayures pendant le transport. Le verre est prêt à être stocker ou directement envoyées aux clients.

# Chapitre III

# Matériel et

# méthodes

### Introduction

Notre travail expérimental se compose essentiellement de deux étapes. La première consiste à faire une analyse chimique et granulométrique pour un échantillon de sable et comparer les résultats obtenus avec les exigences techniques de la société MFG.

La deuxième partie consiste à exploiter les différentes étapes d'élaboration du verre float (procédé du flottage), ainsi que le contrôle de recuit et contraintes thermiques du verre flot.

Durant cette chaîne de fabrication nous avons rencontré des problèmes qui peuvent influencer la quantité et la qualité de produit final, ces problèmes peuvent se résumer comme suit:

L'éclatement de ruban de verre causé par les contraintes thermiques apparues lors de la production de verre mince (< 3 mm) et le verre épais (>10 mm) due à l'hétérogénéité de la répartition de la température sur la plaque de verre.

Les perturbations qui se produisent sur le régime thermique sous l'effet d'un stimulus extérieur comme un fort courant d'air et qui conduit à un mauvais recuit et donc des casses au niveau de l'étenderie.

### III.1. Caractérisation des matières premières (sable)

Étant donné que le sable est le composant principal du verre sodo-calcique utilisé dans la production du verre float, il est indispensable d'effectuer une série d'analyses granulométriques et chimiques à chaque arrivage de sable pour déterminer la composition de notre sable ainsi que le pourcentage de chaque élément présent dans l'échantillon.

A cet effet, nous avons effectué deux ou trois analyses du sable tout dépend des heures de production.

#### III.1.1. Analyses granulométriques

Toutes les analyses granulométriques des différentes matières premières (le sable, la dolomie, la soude, le calcaire...) sont effectués au niveau de laboratoire de contrôle qualité de MFG. - les différents résultats obtenus ont été donnés sous forme de tableaux dans le chapitre 4.

Pour effectuer une analyse granulométrique nous avons suivi la méthode classique, tout d'abord nous avons commencé par peser un échantillon de sable à l'aide d'une balance électrique de grande précision.

L'échantillon à analyser doit être représentatif, pour cela on doit homogénéiser ce dernier et prendre plusieurs prélèvements des différents points. Ensuite, nous avons séché l'échantillon dans une étuve de séchage pendant 1h à 105°C. Le produit ainsi obtenu été mis dans un diviseur rotatif de type (PT-100). La dernière étape consiste à faire un tamisage de l'échantillon à l'aide d'un tamiseur type (Retsch AS200), puis on détermine le refus dans chaque tamis



**Figure III. 1 :** Image d'un tamiseur type  
(Retsch AS200)



**Figure III. 2 :** Image d'un diviseur  
rotatif de type (Retsch PT100)

### III.1.2. Analyse chimique du sable

On prend un échantillon du sable en respectant la règle d'échantillonnage. Ensuite, cet échantillon subit à une étape de séchage dans l'étuve suivi par refroidissement dans un dessiccateur. Après, on le broie dans le vibro-broyeur (Figure.4.4) et prend deux échantillons dans deux enveloppes, un pour l'analyse élémentaire par fluorescence X et l'autre pour la mesure de la perte au feu. On laisse ces deux enveloppes dans l'étuve pendant 10 à 15 minutes, puis on les met dans le dessiccateur.



**Figure III. 3 :** Photo d'une étuve de Séchage



**Figure III. 4 :** Photo d'un vibro-broyeur

### III.1.2.1. Mesure de perte au feu

#### a. Principe

Les matières organiques et les autres matières volatiles dans l'échantillon sont dégagées à haute température, le poids perdu est la perte au feu. Pour la mesure de cette perte au feu, on pèse l'échantillon dans le creuset et on le met à moitié ouvert dans le four 1000°C pendant une heure. Après, on pèse le creuset et on détermine la perte.

Le pourcentage de perte au feu est calculé selon la formule suivante :

$$PF = \frac{G2 - G3}{G2 - G1} \times 100 \longrightarrow (2)$$

Avec

- G1: masse de creuset vide:
- G2: masse de creuset + sable
- G3: masse de creuset+ sable après calcination.

### III.1.2.2. Analyse élémentaire par fluorescence X

La spectrométrie de fluorescence X (FX ou XRF pour X-ray fluorescence) est une technique d'analyse élémentaire qui permet de qualifier et quantifier les éléments chimiques présents dans un échantillon de sable.

Cependant, elle ne peut pas mesurer les éléments légers (faible numéro atomique  $Z$ ). D'autre part les mesures de l'hydrogène H, du lithium Li et du Béryllium Be sont impossibles, et celles du Bore B, du Carbone C, de l'azote N, de l'oxygène O et du Fluor F sont délicates.

### a. Principes physiques

Cette analyse est basée sur le principe suivant:

Nous excitons l'échantillon avec un rayonnement standard (sollicitation avec un tube à rayon X) et nous analysons le rayonnement propre réémis par l'échantillon.

### b. Procédé d'analyse

Dans le but d'analyser un échantillon de sable par la fluorescence X on doit l'adapter à une forme de perl à fin de l'installer dans l'appareil de mesure. Cette forme est obtenue par la fusion d'échantillon à 1000 °C dans un petit four appelé MiniFuse à l'aide des fondants spéciaux utilisés pour abaisser la température de fusion.



**Figure III. 5 :** Photo d'un MiniFuse



**Figure III. 6 :** Image de la mise en forme de perl

L'échantillon sous forme de perl est ensuite introduit dans un spectro analyseurs type BRUKER TIGER qui analyse l'échantillon automatiquement affiche les résultats dans un tableau.



**Figure III. 7 :** Photo d'un spectro-analyseurs de type BRUKER S8 TIGER

### III.2 .Contrôle de recuit et contraintes thermiques du verre float

Avant d'être coupé, le ruban de verre passe sous des pyromètres et sous un scanner. Ce dernier permet de détecter de façon permanente plusieurs types de défauts [défaut de recuisons (contraintes), ou défaut de la structure (bulles d'air)], et à l'aide de logiciel FLOATSCAN les résultats sont affichés dans la salle de contrôle optique sous forme des graphes qui nous donnent : l'épaisseur, la température, les contraintes et les impuretés sur tous les points du ruban. Chacun de ces paramètres à un intervalle de tolérance normalisée.

#### III.2.1. Principe de recuit

La recuisson consiste à relâcher les contraintes produites dans le verre lors de son élaboration. A la sortie d'une ligne float glass, le refroidissement qui s'effectue à partir de la peau du ruban de verre a pour effet d'accélérer la différence de température cœur/peau. En refroidissant, la peau se fige avant le cœur, et il s'ensuit des tensions mécaniques. Le but de l'opération est de ramener ces tensions à un niveau acceptable.

Selon Horst Scholze, la disparition de cette contrainte  $\varepsilon$  répond à la fonction de relaxation De Bast et Gilard [29]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \exp(-At)^b \longrightarrow (3)$$

b est constant pour toutes les températures et prend une valeur de 0,5 pour le verre de silicate sodo-calcique standard. La dépendance de A vis-à-vis de la température se déduit de la relation suivante, en fonction de la viscosité  $\eta$  :

$$A = KE / \eta \longrightarrow (4)$$

Avec :

$\varepsilon_0$  (da N/cm<sup>2</sup>) contrainte initiale,

t (min) temps de relaxation,

E module d'élasticité du verre de silicate sodo-calcique,

K constante,  $K = 3,4 \times 10^9$  si E est exprimé en daN/mm<sup>2</sup>

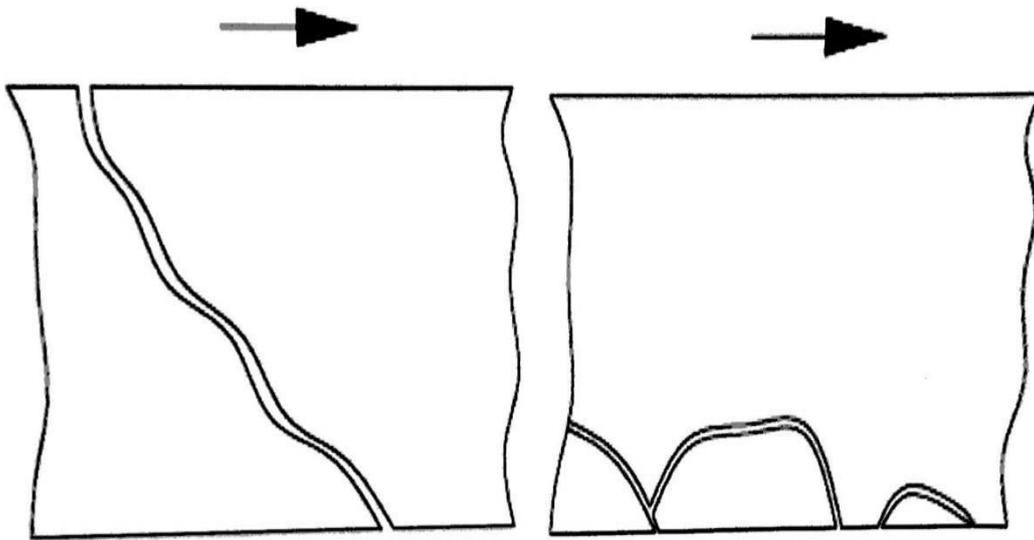
Et en poises  $\eta$  (1 poise = 0.1 poiseuille en SI).

### III.2.2. Contraintes thermiques de recuit

L'hétérogénéité de la répartition de température le long de ruban de verre lors de procédé de recuisson conduit à l'apparition des contraintes thermiques dans la plaque de verre. Nous pouvons diviser ces contraintes thermiques en deux catégories:

#### III.2.2.1. Contraintes thermique de forme

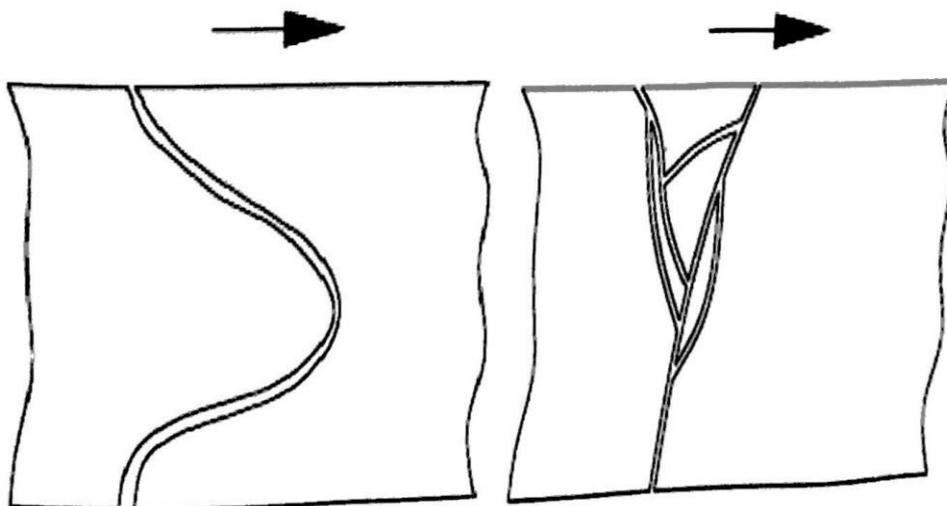
Les contraintes de forme ont leur origine dans la différence de refroidissement entre le centre et les bords du ruban de verre, Par définition, elles sont constantes dans l'épaisseur.



**Figure III. 8 :** Représentation schématique de cases longitudinales résultantes des contraintes thermiques de forme

### III.2.2.2. Contraintes thermiques d'épaisseurs

Ces contraintes sont dues à la vitesse de refroidissement qui est différente entre la surface et le cœur. Ces contraintes d'épaisseur augmentent avec l'épaisseur du verre. Plus la contrainte de compression de surface est élevée, plus la contrainte d'extension de cœur sera grande.



**Figure III. 9 :** Représentation schématique de cases transversales résultantes des contraintes thermiques d'épaisseur

### III.2.2. Réglage de régime thermique.

Pour relâcher ces contraintes, il faut adapter un régime thermique adéquat au niveau de l'étenderie, ce régime change selon l'épaisseur du ruban de verre au cours de production.

Dans notre cas, Le contrôle de régime thermique s'effectué à l'aide des thermomètres infrarouge (pyromètres) et des thermocouples installés le long de l'étenderie.

#### 1. Thermomètres infrarouges:

Un thermomètre infrarouge est un instrument de mesure de la température de surface d'un objet à partir de l'émission de lumière de type corps noir qu'il produit.

Le principe de fonctionnement est basé sur la mesure du rayonnement de l'objet dans le domaine de l'infrarouge d'où le nom de thermomètre infrarouge. On utilise également le terme de pyromètre infrarouge lorsqu'il s'agit de mesurer des températures élevées d'un objet ou d'un environnement (dans notre cas la température de verre).

Les pyromètres utilisés par la société MFG sont de type (HEITRONICS), un appareil de haute performance qui nous a permis d'obtenir des résultats très précis.



**Figure III. 9 :** Photo d'un pyromètre de type (HEITRONICS)

### 2. Thermocouples

Un thermocouple est un dispositif de mesure de température constitué de deux conducteurs différents qui entrent en contact les uns avec les autres en un ou plusieurs endroits, où un différentiel de température est vécu par les différents conducteurs ou semi-conducteurs. Il produit une tension lorsque la température de l'un des endroits diffère de la température de référence à d'autres parties du circuit.

### III.3. Conclusion

Dans ce chapitre, les différents moyens d'analyse et de caractérisation du verre ont été présentés. Nous avons commencé par l'étude et l'analyse de la matière première utilisée dans la fabrication du verre, à savoir la granulométrie et l'homogénéisation de cette matière première.

Les autres moyens de caractérisation du produit fini ont été détaillés en présentant des exemples sur les différentes analyses effectués sur les types de verres.

# Chapitre IV

# Résultats et

# discussions

### IV.1. Analyse granulométrique

#### IV.1.1. Critères d'acceptation du sable

- Le sable utilisé doit contenir environ 99,4% de silice.

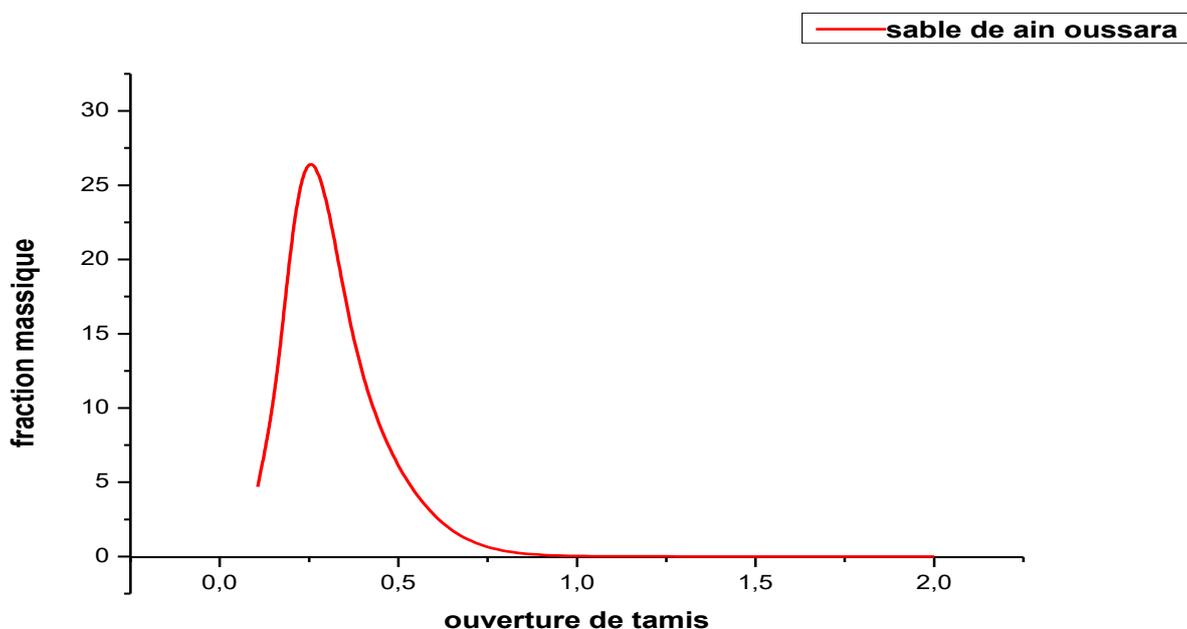
**Tableau IV.1** : Critère d'acceptation de la granulométrie du sable (Norme -ISO-)

| Refus a           | Refus acceptable % |
|-------------------|--------------------|
| 2.0 mm            | 0                  |
| 1.0 mm            | 0                  |
| 630 $\mu\text{m}$ | 0                  |
| 400 $\mu\text{m}$ | 0-5                |
| 315 $\mu\text{m}$ | 10-15              |
| 280 $\mu\text{m}$ | 25-30              |
| 200 $\mu\text{m}$ | 30-35              |
| 160 $\mu\text{m}$ | 10-15              |
| 100 $\mu\text{m}$ | 0-4                |

Les résultats de caractérisation en termes de distribution de fraction granulométrique sont regroupés dans le tableau suivant :

**Tableau.IV.2** : Résultats d'analyses granulométriques (sable d'Ain Ouessara)

| Ouverture de tamis (mm)                  |            | 2    | 1    | 0.630 | 0.400 | 0.315 | 0.250 | 0.200 | 0.160 | 0.106 |
|--|------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Exigence technique de MFG                | Limite INF | 0    | 0    | 0     | 0     | 10    | 25    | 30    | 10    | 0     |
|  | Limite SUP | 0    | 0    | 0     | 5     | 15    | 30    | 40    | 15    | 5     |
| SABLE D'Ain Ouessera (fraction massique) |            | 0.00 | 0.00 | 0.11  | 9.92  | 22.82 | 28.41 | 21.92 | 11.09 | 4.69  |



**Figure V.1** : Courbe cumulative de sable brut d'Ain Ouessara

### IV.1.2. Interprétation des résultats

La courbe précitée représente la distribution granulométrique d'un échantillon de sable brut d'Ain Ouessara, par rapport à la représentation graphique des exigences de MFG concernant la granulométrie de sable tolérée dans le mélange vitrifiable.

D'après cette courbe on peut observer que notre échantillon est pauvre en grosses et fines particules avec un pourcentage de 0,11% pour les grosses particules (0,630 mm) et 4,69 % pour les fines particules (0,106 mm), qui est recommandé pour faciliter la fusion et éviter

les pertes et le volage des particules fines en tête de four.

Par ailleurs, les particules de taille moyenne sont les prédominantes dans l'échantillon avec un pourcentage de 22,82% pour les particules de taille 0,315 mm et de 28.41% pour les particules de taille 0,250 mm.

D'autre part, on peut remarquer aussi que cette courbe est très proche des courbes d'exigences, donc après le traitement du sable on obtient une matière première qui répond aux normes préconisées en industrie verrière.

### IV.2. Résultats de calcul de perte au feu

Le tableau ci-dessous représente les résultats obtenus de la mesure de perte au feu.

**Tableau.IV.3** : Résultats de mesure de perte au feu.

| Creuset | Quantité |
|---------|----------|
| G1      | 17.8585g |
| G2      | 18.8539  |
| G3      | 18.8519g |
| PF      | 0.20%    |

Après le calcul de perte feu nous devons ajouter le résultat trouvé comme une donnée dans Spectro-analyseurs pour réaliser l'analyse chimique de sable par fluorescence X, et cela afin d'obtenir des résultats bien précisées de la composition chimique de chaque élément ainsi que leur pourcentage.

### IV.3. Analyse chimique

Les différents résultats chimiques sont obtenus à l'aide d'un Spectro-analyseurs de type (BRUKER S8 TIGER).

### IV.3.1. Exigence technique de MFG

La politique de production de MFG implique que l'utilisation d'une nouvelle carrière comme un fournisseur de matière première doit être soumise à l'autorisation du laboratoire central de contrôle de qualité de MFG qui est en charge du calcul de la composition et l'analyse du verre.

D'autre part, si les conditions de la production de la carrière (matériel d'exploitation, site d'extraction) sont amenées à changer, le fournisseur est tenu d'en informer au préalable la direction des achats de MFG qui avertira à son tour le laboratoire de MFG.

Les points importants à valider pour le sable sont :

1. Il faut sélectionner une fraction de grains  $\geq$  à 630  $\mu\text{m}$  : et ce pour éviter le risque de mauvaise fusion de silice.
2. Il faut sélectionner une fraction de grains  $\leq$  à 100  $\mu\text{m}$  : pour avoir une fusion optimum où toutes les matières sont en voisinage (d'un point de vue granulométrique).
3. Éliminer toute la chromite (Cr) et le zircon (Zr) qui sont infusibles dans un four de Verrerie.

La limite d'acceptations pour la chromite est 4/5 ppm sur un échantillon de 100 kg de sable.

Le tableau suivant résume la limite inférieure et supérieure des tolérances en éléments chimique dans le sable.

**Tableau.IV.4** : La teneur en éléments exigé par MFG

| Elément chimique               | Exigence technique de MFG |            |
|--------------------------------|---------------------------|------------|
|                                | Limite INF%               | Limite SUP |
| SiO <sub>2</sub>               | 98.90                     | /          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | /                         | 0.40       |
| Fe <sub>2</sub> O              | /                         | 0.070      |
| K <sub>2</sub> O               | /                         | 0.150      |
| Cr <sub>2</sub> O              | /                         | 0.005      |
| TiO <sub>2</sub>               | /                         | 0.030      |
| PF                             | /                         | 0.20       |

### IV.3.2. Résultats d'analyse

Le tableau ci-dessous représente les résultats d'analyse élémentaire par fluorescence X de sable brut d'Ain Ouessara réalisé au niveau de laboratoire de contrôle qualité de MFG.

**Tableau. IV. 5:** Résultats d'analyses par fluorescence X (sable d'Ain Ouessara).

| CODE-ECH           | Teneur %         |                                |                                |                  |                   |               |               |                   |                                |                               |                   |               |
|--------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------------------|---------------|---------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------|---------------|
|                    | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub>  | CaO           | MgO           | MnO               | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Na <sub>2</sub> O | PF            |
| Sable Ain Ouessara | 99.58<br>±0.53   | 0.14<br>±0.07                  | 0.058<br>±0.033                | 0.012<br>±0.008  | 0.0217<br>±0.0046 | 0.05<br>±0.03 | 0.04<br>±0.04 | 0.0020<br>±0.0005 | 0.0013<br>±0.0005              | 0.0032<br>±0.0010             | 0.02<br>±0.008    | 0.07<br>±0.05 |

Le tableau susmentionné représente les différentes espèces chimiques qui se trouvent dans un échantillon de sable brut d'Ain Ouessara. En examinant le tableau précédent, nous remarquons de façon claire un taux de silice très important (99,58%) dépassant largement le seuil d'exigence technique de MFG. Cependant, le taux d'oxyde de Fer coïncide de justesse avec la limite supérieure de tolérance (0,058%), 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.

### IV.4. Problèmes techniques

Au cours de notre stage pratique dans la société MFG, nous avons pu déterminer et classer plusieurs problèmes techniques qui conduisent à l'apparition des défauts sur le ruban de verre, ces derniers ont une influence négative sur le rendement de production. Les pertes générées par ces problèmes sont sous forme de calcin qui est le verre broyé et recyclé au niveau de découpe.

Le système de découpage adapté consiste à couper le ruban de verre 10 mètres avant et 10 mètres après le défaut produit et cela pour protéger l'appareil de découpage, mais ce système résulte des pertes considérables.

#### IV.4.1. Pertes de saturation

Les pertes de saturation sont généralement les plaques de verre broyées et recyclées lorsque l'espace de stockage est saturé par le produit fini qui n'ait pas encore livré ou déplacé vers les ports pour l'exportation.

Un deuxième facteur qui peut influencer sur la quantité de ces pertes est la vitesse de tirage qui est relativement rapide lors de la production du verre mince (3 et 4 mm), ce qui conduit à un encombrement au niveau de stockage.

#### IV.4.2. Pertes de qualité

Les pertes de qualité sont les pertes générées par des défauts entraînés par la qualité de matières premières et les impuretés extérieures, ou des défauts résultants de fusion de matières mélangées, en général, il se présente comme l'inclusion de solide (pierre) et de gaz (bulle d'air).

### IV.4.3. Pertes de mauvaise découpe

Les pertes de mauvaise découpe se caractérisent par les « becs et coins cassés » qui sont des défauts correspondant respectivement à des excès ou manques de matières dans les coins des feuilles de verre. Ils sont tous les deux dus à une déviation de la fracture en dehors du traçage ou trait de découpe.

### IV.4.4. Les pertes de bord

Sont tout simplement les extrémités droites et gauches de la feuille de verre qui contient des traces laissées par les Top Rolls, ces extrémités présentent une énorme quantité de défauts optiques qui ne sont pas tolérés selon les exigences de MFG, donc l'appareillage de découpe au niveau de bout froid fait en sorte d'éliminer, broyer et recycler ces derniers .

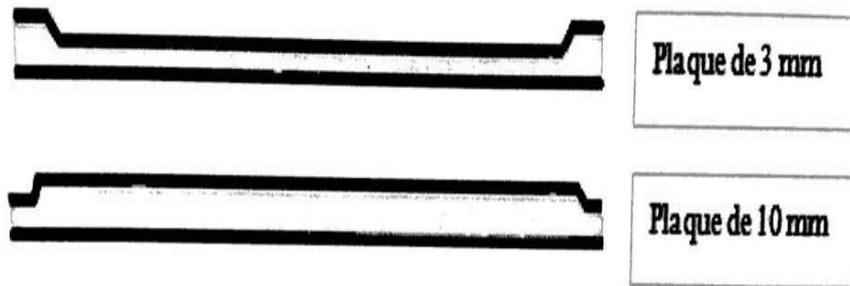
### IV.4.5. Les pertes de casses

Les pertes de casses sont l'objectif de notre étude, elles dépendent essentiellement de régime thermique du recuit qui est très important pour l'obtention d'un verre plus ou moins rigide, néanmoins il y a d'autres paramètres secondaires qui peut également influencer la fréquence des casses survenues

Dans ce qui suit nous allons présenter tous ces paramètres ainsi que leurs influences sur les casses du verre.

#### 1. Régime thermique

La stabilité de régime thermique adapté au niveau de l'étenderie joue un rôle important dans un procédé de recuit sans casses, qui n'est pas évident dans tout le cas de changement d'épaisseur, car lors de la production de verre mince 3 et 4mm et le verre épais 10 et 12 mm, il y aura lieu des hétérogénéités dans l'épaisseur pour la même plaque de verre d'une manière où les épaisseurs des bords et de milieu ne sont pas égales.

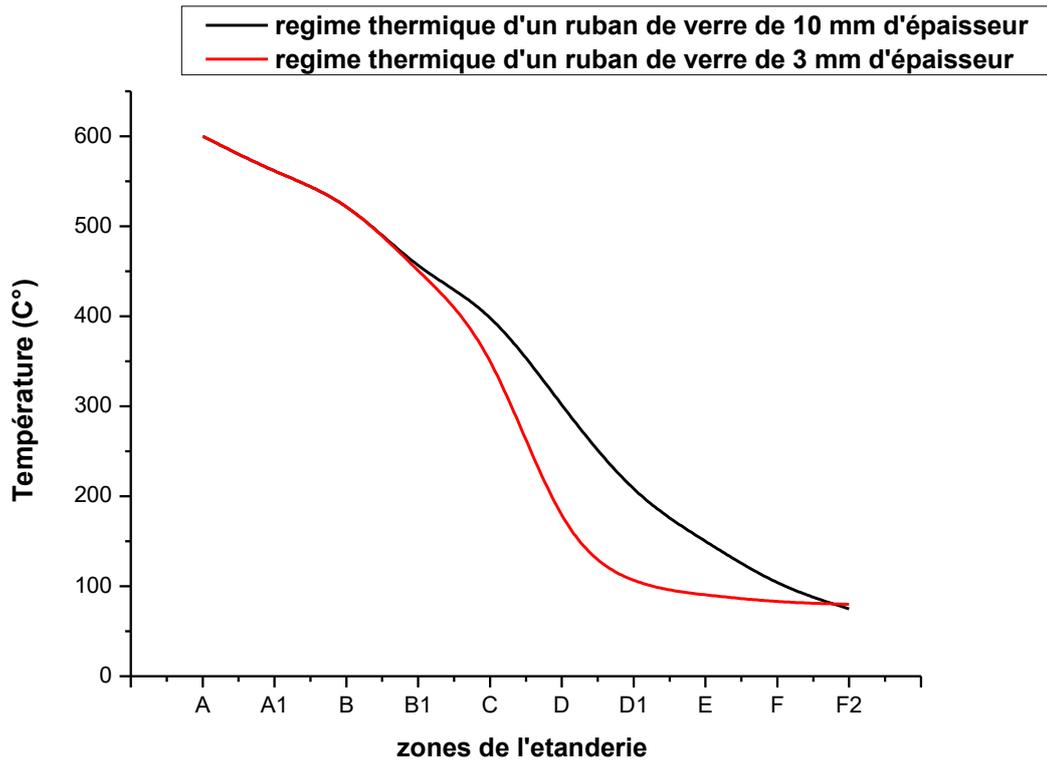


**Figure IV. 2:** Schéma représentant une coupe transversale de deux plaques de verre d'épaisseurs différentes

L'objectif est donc d'assurer le refroidissement synchronisé de ses différentes zones afin d'éviter l'apparition des contraintes thermiques, pour cela des ventilateurs d'air chaud et froid sont installés le long de l'étenderie, ces ventilateurs sont contrôlés automatiquement par les opérateurs de salle de commande.

L'abaissement et l'augmentation de la température se fait à l'aide des vannes automatiques fournissant de l'air chaud et froid, et qui sont contrôlées à partir du sale de commande au niveau de découpe.

Il est donc impératif de changer le régime thermique adapté au niveau de l'étenderie lors de passage d'une épaisseur à un autre, ce changement n'est pas remarquable entre deux épaisseurs voisines, mais comme le montre le graphe. 5.3, nous pouvons voir clairement les variations qui se passent entre les épaisseurs d'extrémités (3 et 10 mm par exemple).



**Figure.IV.3 :** Courbe d'évolution de régime thermique en fonction de l'épaisseur de ruban de verre

Le graphique de figure V.3 montre que le régime thermique de deux épaisseurs est le même jusqu'à la section B1, où la température a diminué de façon très rapide jusqu'à la zone D de 455 °C à 175°C (courbe de 3mm) puis le refroidissement devient lent de la zone D à F ensuite le régime thermique se stabilise de F à F2 à une température de 80°C .

En revanche le refroidissement de ruban de 10 mm s'opère lentement jusqu'à qu'il devient stable dans la zone F2 à 80 °C.

### 2. Pierres et bulles d'air

La bulle d'air est causée par le mauvais affinage de verre. Par rapport au corps fondu de verre, c'est un autre état de la matière, et aussi un défaut d'identification et de résolution plus difficile dans le verre float, son existence génère une hétérogénéité dans le procédé de recuit du plaque de verre ce qui conduit à des casses au niveau de découpe.

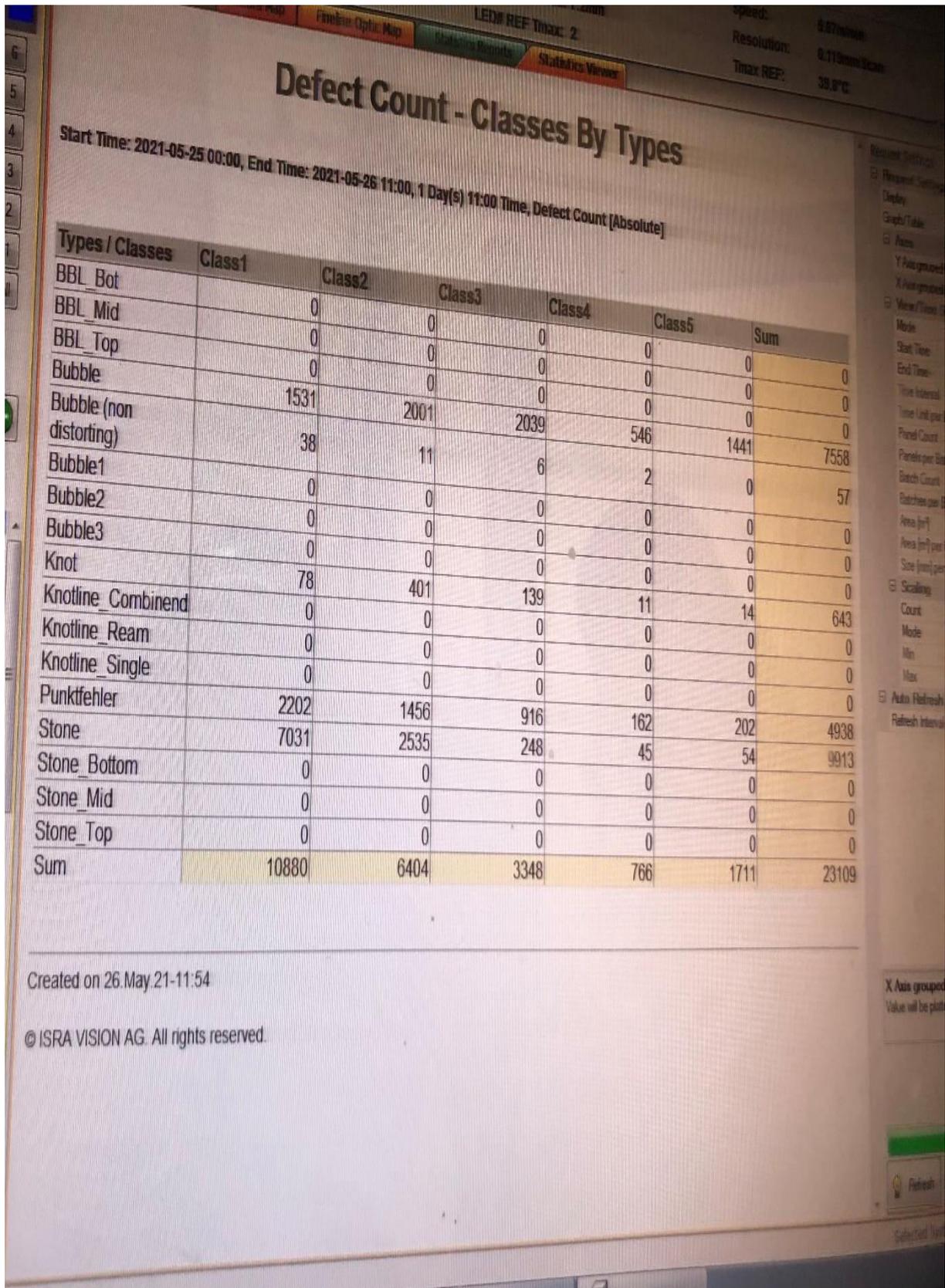


Figure IV. 4 : Classe de nombre de défauts par type

Le tableau suivant résume quelques types de défauts rencontrés lors de la production de verre float.

| Type de défaut    | Cause probable   |
|-------------------|--|
| Bull d'air        | L'atmosphère du point chaud est plus oxydée de manière que l'air ne peut pas être évacué                           |
| Pierre de zircone | La brique AZS de la paroi du bain, la surface de la brique AZS s'est écaillée et s'est produit le défaut de ZIRCON |
| Pierre de silice  | Fusion incomplète de la silice   |
| Pierre d'étain    | Oxydation d'étain  |

Les défauts de grosses dimensions deviennent un centre de cristallisation et par ailleurs un point de fragilisation ou la plus petite perturbation conduit inévitablement à des casses. Ces dernières (casses) sont augmentées si les défauts sont de type « pierre ».

S'il y a une stabilité du mélange vitrifiable, le réglage au niveau du four donnera lieu à une meilleure fusion des matières premières, donc un meilleur produit fini.

### IV.5. Solutions proposées et conclusion

La casse est un paramètre qui dépend essentiellement de la composition du produit fini et de la quantité des défauts. Elle est très active dans le verre mince (3mm) et le verre épais ( $\geq 8$ mm) affectant ainsi le rendement de production.

Cette contrainte vient du fait que la ligne a été étudiée initialement pour la production avec une largeur de 4500 mm mais pour des raisons commerciales cette largeur a été réduite à 3600mm. Cela veut dire que la quantité de chaleur apportée par le verre doit être compensée par les éléments chauffants de l'étenderie. En d'autres termes, une grande chaleur est dégagée de l'étenderie, et se fait ressentir pour toute personne circulant sur l'aire de l'étenderie.

Aussi pour des raisons économiques lors de l'installation, l'ancien bâtiment a été maintenu au niveau de l'étenderie et n'a pas été rénové.

Afin de bien contrôler le régime thermique et réduire les pertes dues aux casses, nous proposons des solutions qui peuvent être réalisées à court et moyen termes.

1. Modifier l'extracteur de chaleur sur le toit du bâtiment de l'étenderie afin de permettre l'échappement de l'air chaud et le renouvellement de l'air frais.

2. S'il y a une contrainte à travailler cette solution (la difficulté de réalisation étant donné que la ligne est en fonctionnement), réaliser des fenêtres d'aération à la sortie de l'étenderie. Cette mesure permettra de faire circuler l'air frais et assurer ainsi un écoulement contrôlé de l'air de refroidissement.

3. Réaliser une étanchéité entre les zones D et F par des rideaux afin d'éviter la circulation d'air externe à contre-courant du verre. Cette mesure va permettre la stabilité du régime de l'étenderie et par conséquent la diminution des casses dues à la perturbation du régime thermique.

4. Etant donné la conception de l'étenderie avec apport d'air frais au-dessous du verre, allonger les conduites d'air froid vers l'extérieur du bâtiment pour les zones A, B, C et F. ceci permettra un refroidissement rapide des zones citées et par conséquent plus de maîtrise du régime thermique.

5. Faire une séparation au niveau de l'étenderie afin de minimiser la circulation de l'air entrant.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

L'objectif de ce travail était d'abord d'exploiter les différentes étapes d'élaboration du verre plat avec une nouvelle technologie appelée (procédé du flottage), avec toutes les techniques qu'elle inclue.

Dans un deuxième lieu nous avons fait un diagnostic global des problèmes techniques rencontrés au cours de production, et plus précisément l'étape de solidification et découpage de verre, dans le but de minimiser les pertes de casses et par la suite augmenter le rendement de production.

L'origine des défauts de verre ainsi que leur influence sur la quantité et les différents types de casses et éventuellement le rendement de production, a été identifiée grâce aux appareillages de contrôle de production et de produit fini au niveau des salles de contrôle et le laboratoire de contrôle de qualité.

Les résultats issus de notre étude ont permis de tirer les conclusions suivantes:

- Pour produire un verre de qualité excellente nous devons utiliser le sable comme une matière première, mais étant donné qu'on a pas encore arriver à une technologie qui nous permet à atteindre le point de fusion de sable, dans ce cas nous sommes obligés d'utiliser d'autres composants secondaires afin d'abaisser le point de fusion et aussi pour ajouter d'autres caractéristiques spécifiques, tout dépend de la qualité de verre que nous cherchons.
- La stabilité de régime thermique dans le four de fusion a une grande influence sur l'apparition des défauts dans le ruban de verre, et donc la quantité des casses produites.
- Le ruban de verre obtenu après le flottage sur le bain d'étain contient toujours des contraintes thermiques qui conduisent à des casses et des défauts optiques ce qui rend notre produit inconvenable, pour cela nous devons les relâcher avec le procédé de recuit.

# Références Bibliographiques

## Références bibliographiques

- [1] Le journal du CNRS, n°181, février 2005.
- [2] CSTC « Le verre et les produits verrières » 1999.
- [3] L. Pilkington « Float Glass Production Process » 16/11/1969.
- [4] A. Boucq, G. Quinif, Y. Quinif « Matière et Beauté, Verre-Reflet feu », Polytechnique de Mons, 2004.
- [5] A. Renda « Cumulative Cost Assessment of the EU Glass Industry. » janvier 1998.
- [6] <https://infovitrail.com/index.php/fr/histoire-du-verre> consulté le 5/05/2021.
- [7] M. Yamane & Y. Asahara « Glasses for Photonics » Cambridge University Press 2000.
- [8] J. Zarzycki, Les verres et l'état vitreux, Edition Masson, Paris, 1982.
- [9] J. Phalippou « Verres Propriétés et application. » Technique de l'ingénieur 2006.
- [10] C. Mazières « Les solides non cristallins » Presses universitaires de France 1978.
- [11] E. Damour, La chimie du verre, Paris & Liège, Librairie Polytechnique CH, 1929.
- [12] C. Maï, H. Satha, S. Etienne, J. Perez, Physical interpretation of creep and strain recovery of a glass ceramic near glass transition temperature, *Mechanics of Creep Brittle Materials-1*, Edited by A.C.F. Cocks and A.R.S. Ponter, **Elsevier Applied Science**, PP. 141-152, **1988**.
- [13] C. Maï, Satha & al, SAXS, WAXD and TEM of the early stages of crystallization in TiO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>-MgO-Li<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> Glass, **Journal of Non-Crystalline Solids**, Vol. 108, PP. 201-206, **1989**
- [14] C. Maï, S. Etienne, H. Satha, J. Perez, Etude et analyse de la déformation non-élastique autour de la transition vitreuse d'un verre borosilicate, **Acta. Metall. Mater.**, Vol. 38, N°2, PP. 337-343, **1990**
- [15] J. Barton & C. Guillemet, Le verre : Science et Technologie, EDP Sciences, 2005.
- [16] D. R. Neuville & al, Du verre au Cristal : nucléation, croissance et démixtion, de la recherche aux applications, ecp-sciences, Chimie/Matériaux, 2013.
- [17] H. Satha, J. Simons, M. Remram, Alternative to lead crystal glass: study of a lead free composition, **Revue Verre**, Vol. 3, N°1, PP. 27-31, **1997**.
- [18] J.M. Haussonne, C. Cary, P. Browen et J. Barton, Traité des Matériaux, Vol. 16, Céramiques & Verres, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, CH-1015 Lausanne, 2005.

- [19] K. Atamnia, S. Satha, H. Satha, M. Gonon, Synthesis, structural and thermal characterization of silica glasses containing BaO, SrO and ZnO, **Mater. Res. Express**, Volume 8 (2021), 015201.
- [20] H. Satha, J. Phalippou, A. Haddad, Silica Glass from Aerosil by Sol-Gel Process: Densification and Textural Properties, **International Journal of Thermophysics**, Vol. 24, N°3, PP. 885-893, **2003**.
- [21] H. Satha, J. Simons, Effet de la composition sur l'indice de réfraction et la densité dans les verres de silice contenant Ba, Sr et Zn, **Ann. Chim. Sci. Mat.**, Vol. 27, N°2, PP. 53-59, **2002**.
- [22] H. Satha, K. Atamnia, F. Despetis, Effect of Drying Processes on the Texture of Silica Gels, **Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology**, Vol.4, PP. 17-21, **2013**.
- [23] Glas Trosch Holding AG, Conseil, Bützberg «Le verre et ses applications» 4<sup>ème</sup> édition, 2013.
- [24] H. Scholze « Le verre » Institut du Verre, Paris, 1974.
- [25] H. Shaybany, « De la structure des verres alumino silicates mixtes, Verres Réfractaires» 1948.
- [26] J. F. Nye, « Physical Properties of Crystals » Clarendon Press, Oxford, 1957
- [27] A. Iratni «cours verre -MCQ » 2012-2013.
- [28] J. Fourment & J Fourmention «Fours de verrerie» Technique de l'ingénieur, 2000.
- [29] P. Gilard, Physico-chimie des silicates, **Tome II** : le verre, Edition-publicité-Impression-Soc. Bruxelles, 1947.

# Annexes

Annexe 1:  
Représentation du lieu  
de stage

## **II Histoire et évolution de MFG**

Mediterranean Float Glass ou MFG par abréviation, est une Entreprise Algérienne qui a pour principale activité, la production et la transformation du verre float.

MFG, est une filiale du premier groupe industriel privé en Algérie CEVITAL., créée en Avril 2007, en vue d'exploiter la plus grande ligne de production en Afrique et l'unique producteur de verre plat au niveau maghrébin, d'une capacité de 600 Tonnes par jour, ce qui est largement supérieur aux besoins nationaux. 70% de la capacité installée est donc destinées à l'exportation.

Le complexe est implantée au niveau du site de l'Arbaa dans la wilaya de Blida et 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 57 usines de transformation de verre.

Sur le plan national, MFG a commencé à commercialiser sa production localement en Septembre 2007, actuellement le verre MFG s'est imposé sur le marché local au détriment de l'activité d'importation qui a pratiquement était interrompue depuis le début de l'année 2008.

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.

Nous pouvons donc dire que MFG est le leader du verre sur le marché national, dans la mesure où il détient le quasi-monopole sur l'ensemble du territoire national.

### **III.2. Objectifs de MFG**

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

- Satisfaction des clients;
- Optimiser sa part du marché international
- Satisfaire les demandes du marché
- Respecter l'environnement et l'hygiène et sécurité de ses employés,
  
- Aboutir les certificats suivants :
- ISO (international standardisation organisation)
- QHSE (qualité, hygiène, sécurité environnement)

- Un développement qualitatif et quantitatif de la production, pour cela, la société MFG envisage de réaliser une deuxième ligne d'une capacité de 800tonnes/jour.
- La réalisation de ce projet constitue l'une des étapes pour faire de MFG un opérateur incontournable dans le monde du verre plat.

### **III.3. Les effectifs de MFG**

MFG compte actuellement plus de 750 salariés qui mettent en pratique leurs compétences dans différents métiers afin de fournir un produit de choix et un service de qualité.

Motivés par l'excellence tous partagent le même esprit de performance et les mêmes principes fondamentaux d'écoute, d'échange et d'innovation pour générer de la valeur et créer de la richesse pour toutes les parties prenantes actionnaires, collaborateur, clients et société civile.

### **III.4. Développement**

Dans le cadre de l'extension de ces capacités de production MFG envisage de réaliser une 2<sup>ème</sup> ligne d'une capacité de 800tonnes/jour la réalisation de ce projet constitue l'une des étapes pour faire de MFG un opérateur incontournable dans le monde du verre plat.

Par ailleurs dans le but d'optimiser sa part du marché international, MFG diversifie sa gamme de production à l'export en créant sa ligne de verre feuilleté avec une capacité de 400tonnes/jour essentiellement en format PLF.

Mais pour satisfaire les demandes du marché national MFG prévoit de doter cette Ligne de table de découpe en formats DLF et 1/2DLF.

*Annexe 2:*  
*Attestation de Stage*



Réf: 0017DRH/MFG/2021

# ATTESTATION DE STAGE



Nous soussignés **Mediterranean Float Glass Spa**, Filiale du Groupe **CEVITAL**, dénommée **MFG Spa** sise  
À 29 Route de Meftah L'Arbaa Wilaya de BLIDA 093000 – ALGERIE, attestons que :

**Mr . AMIROUCHE Ahmed Razik**

Etudiant (e) à L'Université 08 Mai 1945  
Guelma

, à suivi un stage pratique durant la période allant

Du **01/05/2021** au **30/05/2021** au sein de **MFG SPA**, auprès de **Direction Production Float**.

Cette attestation est délivrée à l'intéressé(e) pour servir et valoir ce que de droit.

L'Arbaa, le 02 Juin 2021

Le Directeur des Ressources Humaines

**Mr. ZUKRANIL Abdelhalim**  
Directeur des Ressources Humaines



**COMPLEXE INDUSTRIEL MFG**  
29, route de Meftah - L'Arbaa - 09300 W. Blida - Algérie  
Tel. : +213 21 448 602 / 448 597 Fax : +213 21 448 555  
E-mail : [commedz@mfg-dz.com](mailto:commedz@mfg-dz.com)  
[www.mfg-dz.com](http://www.mfg-dz.com)