

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saad DAHLEB BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés



Mémoire

Pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie des Procédés

Option : Génie des Procédés des Matériaux

Thème :

***Etude et caractérisation des défauts issus du
bain d'étain et amélioration du rendement de la
production***

Présenté par :

BOUZIA Khaoula

KLALIB Qamar

Encadré par :

Mr. Omar BOURAS

Mr. Mohamed Amine MOUZAOU

2022/ 2023

Dédicacées

الى اعز من صبرت ورعت.... الى معنى الحب والحياة

ملهمني امي

الى سندي الدائم ومنبع طموحي.... الى الرجل الأول في حياتي

رفيق دربي ابي

الى من احاطوني بالتشجيع الدائم.... الى من هم حزام ظهري

وكياني

اخواتي الثلاث نسبية رحاب مرام

وقمري الصغير اخي يونس

إلى من جالت معي بين صفحات الاوراق فتحملت عناء كل

الأوقات.... الى ذاتي الطموحة

KHAOULA

Dédicacées

❖ *A ma très chère mère...*

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

❖ *A mon très cher père...*

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

❖ *A mes très chers sœurs Faiza, Zahra et mon frère Mohamed*

❖ *A mes chères nièces Amira et Nesma*

Puisse ALLAH le tout puissant vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite

QAMAR

Remerciements

Tout d'abord nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la santé et la patience pour achever ce travail.

Nous tenons à présenter nos sincères remerciements et notre gratitude à notre promoteur Monsieur BOURAS Omar pour sa disponibilité, son aide précieuse, son soutien tout au long de ce travail et ses conseils qui nous ont été très utiles.

Nous tenons à remercier notre Co-promoteur Mr Mouzaoui Mohamed amine pour sa patience et sa disponibilité, il nous a beaucoup appris et n'a pas hésité à partager ses connaissances avec nous. Nous le remercions également pour avoir consacré son temps et ses efforts pour avoir aidé à bien mené notre travail.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères à tout l'ensemble des ingénieurs de « ligne float » et du laboratoire central, pour Avoir répondu à nos diverses questions, aux conseils, la patience et la gentillesse tout au long de la durée de notre stage.

Enfin, nous remercions toute personne ayant contribué, de près ou de loin, durant la réalisation de ce travail.

Liste de l'abréviation :

DLF	dimensions largeur de fabrication
DDLf	Dimensions largeur de fabrication livrée
PLF	plateaux largeur de fabrication
1/2 DLF	½ dimensions largeur de fabrication
FI	Face inferieure du verre float
FS	face supérieure du verre float
PPN	Photo prise par nous
Bay 0	Entre du bain d'étain
CL	Classe de défaut
AZS-33#	Les briques (Alumine, sable 65% zircon et 33% silice)
AZS-36#	Les briques (Alumine, sable 65% zircon et 36% silice)

ملخص:

قمنا بعمل دراسة على الزجاج الطافي لشركة أم أف جي، حيث جمعنا مجموعة عينات من الزجاج (منتج نهائي) الذي يحتوي على عيوب قصد القيام بالتحاليل اللازمة لمعرفة نوعية العيب وطبيعته الكيميائية.

من بين العيوب الناتجة على طول خط الإنتاج سلطنا الضوء على التي تظهر في مرحلة التشكيل اي التي تأتي من عملية طفو الزجاج على القصدير داخل الحوض

قصد تتبع مصدرها الأساسي الذي يتسبب في ظهورها، إضافة إلى معرفة الطرق المصححة لها وتطبيقها

واخيرا، دراسة ما مدى تأثير ظهور مثل هذه العيوب بصفة عامة على المردود العام للإنتاج

الكلمات المفتاحية: زجاج طافي، حوض القصدير، تشكيل، عيوب، القصدير، اكسيد القصدير، مردود الإنتاج.

Abstract :

We conducted a study on float glass for MFG Company, where we collected a set of samples of glass (finished product) that contains defects in order to carry out the necessary analyzes to know the quality of the defect and its chemical nature. Among the defects produced along the production line, we highlighted those that appear at the stage The formation that comes to us from the process of floating the glass on the tin inside the basin in order to trace its main source that causes its appearance, in addition to knowing the methods corrected for it and applying it. Finally, a study of the effect of the appearance of such defects in general on the general yield of production.

Keywords : Tin basin, Formation, Defects, Tin, Tin oxide, Production yield.

Résumé :

Nous avons mené une étude sur le verre flotté pour la société MFG, où nous avons collecté un ensemble d'échantillons de verre (produit fini) contenant des défauts afin de réaliser les analyses nécessaires pour connaître le type de défaut et sa nature chimique ,Parmi les défauts résultant le long de la chaîne de production, nous avons mis en évidence ceux qui apparaissent dans l'étape de formation qui correspondent, processus de flottage du verre sur l'étain à l'intérieur du bain.

Afin de retracer sa source principale qui provoque son apparition, en plus de connaître et d'appliquer des méthodes correctives

Enfin, une étude de l'effet de l'apparition de tels défauts en général sur le rendement général de la production

Mots clés : Verre flotté, Bain étain, Formage, Défauts, Etain, Oxyde d'étain, Rendement de Production.

Liste de figure

Chapitre 1 : Notion de base Sur le verre Sur le verre

Figure I.1 Evolution du volume molaire VM (ou H) depuis le liquide stable jusqu'au solide, pour un verre et un cristal.

Figure I.2 : Variation de la viscosité en fonction de la température.

Figure I.3 : Chaleur spécifique d'un verre sodo-calcique en fonction de la température.

Figure I.4 dispositif pour la mesure de la conductivité thermique.

Figure 1.5 évolution de l'indice de réfraction et de l'absorption du verre en fonction de la fréquence ou de la longueur d'onde de la lumière incidente.

Figure I.06: Situation du spectre de transmission du verre par rapport aux spectres des rayonnements solaire et terrestre et à la lumière visible.

Chapitre III : Etapes de fabrication du verre plat

Figure III.01 : Photo du verre float de la société (MFG)

Figure III.02 : photo Quelques applications du verre float fabriqué par la MFG : (a) façade, (b) fenêtre, (c) verrière, (d) porte de four

Figure III.03: Schéma de la ligne MFG.

Figure III .04 : Vue d'en haut du four de fusion

Figure III .05 : Schéma les différentes zones du four

Figure III .06 : Schéma des différentes parties de la zone de fusion

Figure III.07 : (a) Schéma de brique d'empilage de la chambre, (b) photo de brique d'empilage de la chambre.

Figure III.08 : Schéma de four float a flamme transversale

Figure III.09 : Schéma de Fränkel

Figure III.10 : Schéma d'un bain d'étain

Figure III.11 : (a)top roll ;(b) top roll en contact avec le ruban de verre.

Figure III .13 : Photo des refroidisseurs.

Figure III.14 : Processus de contamination d'étain.

Figure III.15 : Photo de section étenderie (MFG)

Figure III.16: Photo montrant découpage du verre selon les formats demandé et son stockage

Figure III. 17 : (a) Photo d'enlèvements des bords du ruban ;(b) schéma d'enlèvements des bords du ruban

Figure III.18 : Photo de test zébra

Figure III.19 : (a)Photo de Verre sans déformation, (b) Photo de Verre déformé

Figure III. 20: Photo de Le pupitre lumineux

Chapitre IV : Matériel et Méthodes

Figure IV.1 : Photo de Microscope optique (LEICA DMP) (PPN)

Figure. IV.2: Photo d'un Mini Fuse

Figure. IV.3: Image de la mise en forme de perle

Figure IV. 4 : Photo de Fluorescence X (PPN)

Figure IV.5: Vue de L'emplacement des de échantillons (PPN)

Figure IV.6 : (a) Photo de Détecteur de phase ; (b) la phase supérieure ;(c) la phase inférieur (PPN)

Figure IV.7 : (a) Photo de l'analyseur d'oxygène portable (PPN) ; (b) Station des gaz de protection de MFG

Figure IV.08 : Photo de système d'inspection « SpecGAGE3D d'ISRA VISION »

Chapitre V : Résultats et Discussions

Figure V.01 : Histogramme de nombre des défauts pondent 10 jours.

Figure V.02 : Photo montrant la pierre d'oxyde d'étain SnO₂.

Figure V.03 : (a), (b) Photo montrant Pierre d'oxyde d'étain SnO₂ sous le microscope 20 (c), (d) Photo de Pierre d'oxyde d'étain SnO₂ référentiel...

Table V.03 : Nombre du défaut de pierre d'oxyde d'étain trouvés lors de l'analyse.

Figure V.04 : (a), (b) Photo montrant la Pierre d'oxyde d'étain en aiguille sous le microscope 20um

(c) Photo de Pierre d'oxyde d'étain en aiguille référentiel

Figure V.05 : (a), (b) Photo montrant la Pierre d'Oxyde d'étain en Corail sous le Microscope 20um (PPN).

(c) Photo de Pierre d'oxyde d'étain en corail référentiel.

Figure V.06: (a), (b) Photo de pierre d'étain sous le microscope 20um (PPN)

(c) Photo de pierre d'étain référentiel

Figure V.08 : Photo montrant la tache de rôle sous le microscope 20um

Figure V.09 : Photo montrant un bulle d'air sous le microscope 20um

Figure V.10 : Photo montrant une déformation optique avec corps sous le microscope 20um

Figure V.11 : (a), (c) Mauvaise étanchéité, sortie de flamme, (b) Mauvaise étanchéité, perte de pression, (d) Mauvaise étanchéité dans les endroits cachés

Figure V.12 : Photo du système venting

Figure V.13 : Photo de l'accumulation de SnO₂

Figure V.14 : Photo de Moteur linéaire

Figure V.15 : Courbe de la pression de H₂ à l'entrée de bain d'étain.

Figure V.16: Courbe de la pression de N₂ à l'entrée de bain d'étain.

Figure V.17 : Photo des zones de bain d'étain

Figure V.18: Photo représente la pression de bain d'étain donc les 3 zones.

Figure V.19 : Courbe de la variation de pression bain dans ses trois régions.

Figure V.20: Photo dès les rouleaux avant le nettoyage.

Figure IV.21:Photo montrant les rouleaux après le nettoyage (PPN)

Figure V.22: histogramme des défauts par rapport les classes

Figure V.23 : la courbe de rendement de production de verre flot en fonction des jours.

Liste de tableau

Chapitre I : Notion de base Sur le verre Sur le verre

Tableau I.1 : Points fixes de viscosité

Tableau I.2 : Dilatation thermique de quelques verres.

Tableau I.3 : Différentes catégories de verres industriels

Chapitre II : Présentation du lieu de stage

Tableau II.1 : Caractéristiques principales du verre MFG

Chapitre III : Etapes de fabrication du verre plat

Tableau III .1 : Sources de matières premières de MFG.

Tableau III.2 : Différents formats de la feuille fabriquée (MFG)

Chapitre V : Résultats et Discussions

Tableau V. 01: Types et nombre du défaut identifiés par MO

Tableau V.02 : Nombre du défaut de pierre d'oxyde d'étain trouvés lors de l'analyse.

Tableau V .03 : Nombre du défaut de trouvés lors de l'analyse.

Tableau V.04 : les proportions des composants dans un échantillon du verre

Tableau V.05 : Impureté des gaz de protection.

Tableau V.06: Les classes des défauts selon leurs Dimensions

Tableau V.07 : Classe de nombre de défauts par type d'ISRA

Tableau V.08 : le rendement de la production.

Tableau V.09 : le rendement de qualité

Sommaire

Chapitre I : Généralités sur le verre.....	1
2.1 Historique	1
2.2 Définition du verre	2
2.3 Structure et vitrification	4
2.3.1 Critère de GOLDSHMIDT.....	4
2.3.2 Règles de ZACHARIASEN	4
2.3.3 La transition vitreuse	5
2.4 Propriétés du verre	6
2.4.1 Propriétés rhéologiques	6
2.4.2 Tension superficielle	7
2.4.3 Propriétés électriques	8
2.4.4 Propriétés mécaniques.....	8
2.4.5 Propriétés thermiques.....	10
2.4.6 Propriétés optiques	12
2.4.7 Propriétés chimiques	14
2.5 Types de verre	16
2.5.1 Verres de borosilicatées	17
2.5.2 Verres d'aluminosilicates.....	18
2.5.3 Verre au plomb.....	19
2.5.4 Verres à base de zircon.....	20
2.5.5 Verres sodo-calciques	20

Chapitre II : Présentation du lieu de stage	23
3.1 Description général de MFG CEVITAL	23
3.1.1 Caractéristiques principales:	23
3.1.2 Domaine d'activité	24
3.1.3 Produit Fini.....	Erreur ! Signet non défini.
3.1.4 Effectifs de MFG.....	24
3.1.5 MFG entreprise durable.....	24
3.1.6 MFG développement.....	25
3.1.7 Ateliers de MFG	25
Chapitre III : Etapes de fabrication du verre plat	27
4.1 Définition du verre float	27
4.2 Applications du verre float	28
4.3 Présentation générale du procédé	29
4.4 Contrôle qualité	52
4.4.1 Règlements du contrôle de la qualité	54
Chapitre IV : Matériel et Méthodes	58
5.1 Introduction	Erreur ! Signet non défini.
5.2 Matériel et Méthodes.....	58
5.2.1 Microscope optique (MO).....	59
5.2.2 Fluorescence X.....	59
5.2.3 Détecteur de phase	61
5.2.4 Analyseur d'oxygène.....	62
5.2.5 Système d'inspection «ISRA VISION ».....	63

Chapitre V. Résultats et Discussions	65
6.1 Introduction	65
6.2 Parti 01 : Identification des défauts	66
6.2.1 Identification par microscope optique.....	66
6.2.2 Identification par Fluorescence X.....	75
6.2.3 Identification macroscopique	76
6.2.4 Identification par Analyseur d'oxygène	84
6.3 Parti 02 : Les solutions des défauts	85
6.3.1 Les taches	85
6.3.2 Pierre d'étain	85
6.3.3 Pierre d'oxyde d'étain	85
6.4 Parti 03 : Le rendement de qualité	87
6.4.1 Introduction	87
6.4.2 Identification par Analyseur d'oxygène	87
Conclusion générale	92
Annexe	94
1. Annexe 01 : l'étain.....	94
2 .Annexe 02:.....	80
3. Annexe 03 : Dioxyde de soufre SO ₂	97
4. Annexe 04 : Microscope optique	98
Annexe 05 : Fluorescence X.....	99
Référence bibliographique	114

Introduction

Générale

INTRODUCTION GENERALE

Le verre est l'un des plus anciens matériaux connus par l'homme. « L'obscur nature du verre » est mentionnée dans une édition spéciale du journal du CNRS à l'occasion du centenaire de la physique comme étant l'une des dix plus grandes énigmes de la physique de ce siècle.

Depuis ses premiers pas dans la confection et l'obtention de verres, l'homme s'est intéressé énormément aux verres d'oxydes et plus particulièrement à ceux contenant de la silice. De par son abondance naturelle, le sable très économique s'est donc imposé, dans l'industrie verrière, comme l'un des constituants principaux de ces verres. En effet, les verres de silicates présentent des propriétés notables telles qu'une grande résistance aux chocs thermiques, une inaltérabilité dans le temps, la possibilité de véhiculer de l'information sous forme de fibres optiques dans les réseaux de télécommunication...etc. Ce qui lui permet de trouver sa place dans la technologie des matériaux.

Le terme « float » se réfère en même temps à la technologie la plus récente pour produire du verre plat avec un certain niveau de qualité. Ce principe a été découvert au milieu du XIXème siècle par BESSEMER. Différents brevets ont été déposés aux États-Unis lorsque certains verriers, comme PPG ont commencé à expérimenter le procédé float, au début des années 1960, Le verrier Anglais PILKINGTON a mis au point le procédé « Float Glass » qui avait révolutionné l'industrie verrière et a conduit à l'abandon progressif des anciens procédés de fabrication de la glace et du verre à vitre.

Dans ce contexte, l'objectif principal de cette étude est : **résolution des problèmes Pour éviter les défauts afin d'améliorer le rendement de la production.**

Ce manuscrit est structuré en deux parties principales :

❖ Une partie théorique divisée en deux chapitres :

Le premier chapitre présente les généralités sur le verre, l'historique de verre, les propriétés physico-chimiques, les différents constituants et les techniques d'élaboration.

Le deuxième chapitre est consacré pour au procédé *float glass*, Il résume toutes les étapes de fabrication de l'enfournement des matières premières et jusqu'au produit fini, ainsi les appareillages utilisés dans ce procédé.

❖ Une partie expérimentale répartie en deux parties:

- Matériel et méthodes
- Résultats et discussion

En fin une conclusion générale présentant l'essentiel des résultats obtenus.

Partie

Bibliographique

Chapitre I

Notion de base

Sur le verre

Chapitre I : Généralités sur le verre

1.1 Historique

Comme toute autre industrie, la technologie verrière a son histoire ; ses débuts, ses tâtonnements et un développement fulgurant qu'elle connaît depuis le siècle dernier.

Historiquement, es premières traces d'objets en verre taillés par l'homme ont été mis en évidence dans la préhistoire. Elles remontent à 100 000 ans avant notre ère. A cette époque-là l'homme utilisait déjà l'obsidienne (un verre volcanique naturel), les tectites, les billes de verres formées lors d'impacts de météorites avec la terre et les fulgurites issus de la fusion du sable provoquée par la foudre.

C'est aux environs de 3 000 ans avant J.C, dans des régions telles que la Mésopotamie, l'Égypte ou la Syrie, qu'on a retrouvé les premières ébauches de ce que sera le verre que l'on connaît aujourd'hui. A l'aide d'outils rudimentaires, on a élaboré le premier verre, opaque, de couleur verte ou bien bleue.

La technologie des fours permettant d'élaborer du verre connaît une certaine avancée vers l'an 1500 avant J.C où on a pu obtenir un verre translucide.

Le premier siècle avant J.C connaîtra deux évènements qui marqueront la verrerie pendant longtemps :

Apparition de la technique de soufflage (probablement en Syrie avant qu'elle n'atteigne l'Espagne après être passé par l'Italie et la Gaule).

Apparition du verre transparent à Sidon (Phénicie). Ces deux découvertes préparèrent le terrain à la démocratisation du verre. Dès lors le verre fut largement utilisé sous l'empire romain pour les récipients et même les vitrages.

Par la suite, la fabrication du verre creux est apparue du fait de l'aisance et de la sécurité que propose le travail avec la canne à souffler

Vers le Vème et le Xème siècle, la technique de soufflage pour inventer le soufflage (en couronne et le soufflage en manchon) a été inventée.

Le soufflage en couronne est apparue en premier lieu à l'ouest de la France et en Angleterre (utilisée jusqu'au XIX^{ème} siècle) qui a permis de fabriquer le verre plat en soufflant ce dernier pour former un globe creux puis aplati et coupé. [1]

La deuxième technique (soufflage en manchon) a été utilisée pour la première fois en Europe centrale et à l'est de la France, consistait à faire souffler le verre pour fabriquer une bouteille creuse appelée manchon. [2]

À partir du XV^{ème} siècle, les verreries vénitiennes (par exemple Murano) parviennent à éliminer, par lessivage, les éléments colorants contenus dans les cendres végétales. Ce nouveau procédé a permis d'obtenir un verre clair «le cristallo». Celui-ci a assuré la domination du marché du verre à Venise pendant deux siècles.

C'est avec la révolution industrielle au XIX^{ème} siècle l'industrie du verre a connu un premier pic de production, notamment avec le développement des méthodes de laminage et de fonte en continu.

La dernière date clé dont on pourrait parler est bien entendu l'invention du procédé de verre flotté. Dans ce procédé, inventé par Sir Alastair Pilkington en 1952, le mélange de matières premières est chargé en continu dans le four de fusion. À la sortie du four, le verre forme un ruban flottant à la surface de l'étain fondu. La surface de l'étain fondu est extrêmement lisse, donnant au verre une planéité de surface parfaite.

Aujourd'hui, il existe à peu près 260 usines ou fabriques de par le monde appliquant le procédé float dont deux en Algérie dont, la production globale est d'environ 800000 tonnes de verre par semaine. [3]

1.2 Définition du verre

Plusieurs définitions ont été proposées pour définir un verre. En effet, l'Encyclopedia Universalis (Reyches, 1989) rapporte de nombreuses définitions du verre selon différents points de vue :

> Définition courante : C'est un solide obtenu par le figeage d'un liquide. [4]

> Définition structurale : C'est un solide non cristallin. [5]

On peut aussi dire que le verre est formé par un assemblage tridimensionnel désordonné de groupements structuraux fondamentaux, semblables à ceux de l'état cristallin ;

> Définition thermodynamique : il s'agit d'un matériau hors d'équilibre, dont l'énergie est supérieure à celle des produits cristallisés correspondants et dont le retour à une situation plus stable (cristallisation) ne peut pas se faire qu'après des durées considérables.

Selon l'American Society for Testing Matériaux (1945), le verre est un matériau inorganique produit par fusion, qui a été refroidi dans des conditions qui ont empêché sa cristallisation.

D'après Zarzycki (1982) le verre est donc solide non cristallin présentant une transition vitreuse et selon Sholze (1991), le verre est un liquide surfondu figé. [6]

La modalité de solidification d'un verre est très différente de celle de la silice cristalline. Lorsqu'on refroidit de la silice fondue, elle cristallise à une température donnée (température de cristallisation : T_c).

En revanche pour un verre, pendant un intervalle dit de transformation (entre T_t et T_c), on assiste à un passage progressif par des états de viscosité différents, de l'état liquide vers l'état vitreux.

Dans cet intervalle, le verre se comporte comme un liquide surfondu. T_t est définie comme la Température de transition ; pour un verre silicaté il s'agit de la température à laquelle la viscosité est voisine de 10¹³ poises (Zarzycky, 1982). [7]

1.3 Structure et vitrification

1.3.1 Critère de GOLDSCHMIDT

En cherchant les conditions de vitrification pour les oxydes simples de formule stœchiométrique, Goldschmidt a cru que le critère pouvait être le rapport r_A/r_O des rayons ioniques du cation et de l'oxygène.

Pour les oxydes formant des verres, ce rapport devrait être compris entre 0,2 et 0,4 or d'après les considérations classiques de cristalochimie, pour des structures ioniques, ce rapport est en relation directe avec le nombre de coordination du cation central, d'où l'intervalle proposé implique donc une coordination tétraédrique. [8]

1.3.2 Règles de ZACHARIASEN

Un examen plus complet de différents cas montre que le critère de Goldschmidt est insuffisant : l'oxyde de BeO par exemple qui pourtant satisfait au critère étant impossible à vitrifier.

Zachariasen a repris le problème et, par un raisonnement empirique, a établi un ensemble de règles qui ont eu un retentissement considérable sur la recherche verrière. Son analyse était fondée sur la considération suivante :

a) les forces de liaisons interatomiques dans le verre et dans le cristal doivent être semblables, étant donné les propriétés mécaniques voisines des deux types de solides.

b) comme les cristaux, les verres doivent être formés par un "réseau" tridimensionnel étendu, mais le caractère diffus des spectres de diffraction X montre que ce réseau n'est pas symétrique et périodique comme dans les cristaux, c'est à dire qu'il n'y a pas d'ordre à longue distance.

Le désordre du réseau introduirait une distribution des forces de liaison. Leur rupture progressive au chauffage expliquerait la décroissance graduelle de la viscosité. Le désordre expliquerait de plus un contenu énergétique supérieur à celui du cristal.

Zachariasen a montré qu'un oxyde formant un verre devrait satisfaire à l'ensemble des règles suivantes :

1. - le nombre d'oxygènes entourant 1 'atome cation doit être petit,
- 2.- aucun oxygène ne doit être lié à plus de deux cations A. [8]

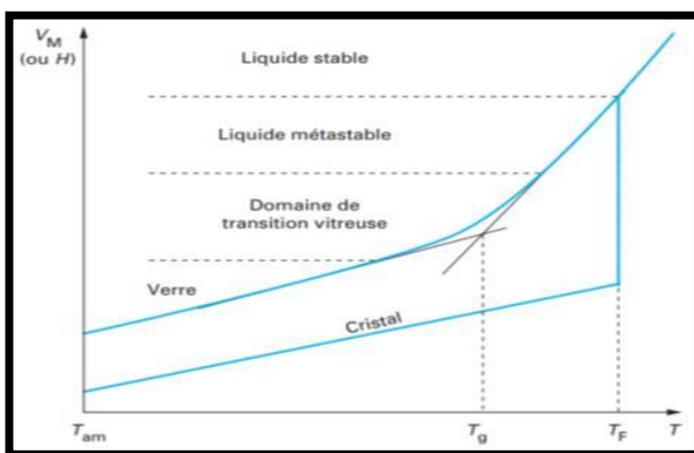
1.3.3 La transition vitreuse

Un verre n'est pas simplement un liquide surfondu. En dessous du liquides le volume spécifique (comme d'autres propriétés) pour suit l'évolution déjà manifestée par le liquide stable et il n'y a pas de changement de pente (c'est à dire de coefficient de dilatation).

En pour suivant le refroidissement, la viscosité continue d'augmenter de façon exponentielle et le liquide devient quasiment solide tout en conservant le même coefficient de la dilatation .A une viscosité près de 10^{13} poises (12 pa.s) la rigidité du empêche en fin le rajustement des positions des atomes que nécessite la contraction du liquide et le coefficient du dilatation assumé alors une valeur plus faible typique d'un solide cristallin.

Ce changement de pente signale ce que l'on appele la transition vitreuse par laquelle L le liquide surfondu se transforme en verre . La température à laquelle se produit cette transition

T_g n'est pas strictement invariable pour un système donné mais diminue de façon mesurable lorsque la vitesse de refroidissement diminue. [7]



T_f Température de fusion.

T_g Température de transition vitreuse qui intersection des courbes extrapolées à partir du liquide et du verre.

T_{am} Température ambiante.

Figure I.1 Evolution du volume molaire V_M (ou H) depuis le liquide stable jusqu'au solide, pour un verre et un cristal[7].

1.4 Propriétés du verre

1.4.1 Propriétés rhéologiques

1.4.1.1 Viscosité

La viscosité peut être définie comme le frottement interne des liquides. Elle est mesurée en poise, le poise étant la viscosité dynamique d'un liquide opposant une résistance d'une dyne au glissement dans son plan d'une surface plane d'un centimètre carré, avec un gradient de vitesse d'un centimètre par seconde et par centimètre.

Elle est désignée, par la lettre grecque ζ . Son inverse, utilisé dans certains calculs, η , est la fluidité. La viscosité est la caractéristique la plus importante des verres. Sa connaissance est indispensable à leur élaboration et à leur utilisation. Elle conditionne, en particulier, tous les procédés de façonnage. [9]

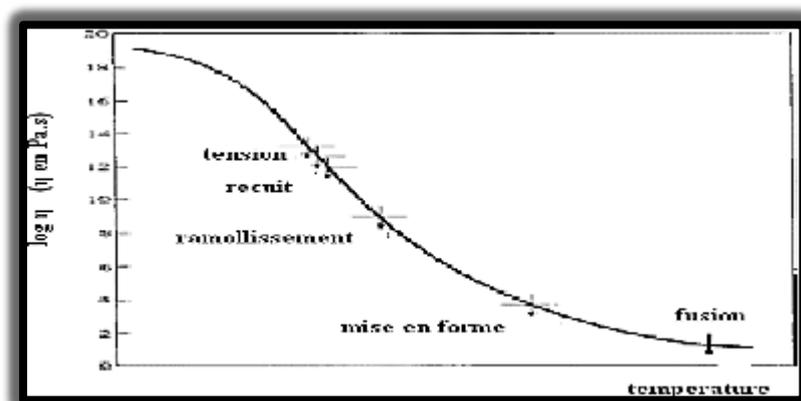


Figure I.2 : Variation de la viscosité en fonction de la température. [9]

Tableau I.1 : Points fixes de viscosité. [9]

Points Fixes	log ζ (ζ en Pa.s)	Opération technique
Température de fusion	1	Fusion et affinage
Température de travail	3	Cueilage, moulage, étirage, laminage, soudure
Température de ramollissement	6,65	Soufflage (Littleton)
Température de ramollissement dilatométrique (point R)	10	Sortie de moule
Point de recuit	12	Début de recuisons
Point S (transition vitreuse)	12	
Point de contrainte	13,5	Fin de recuisons
Point I	15	

1.4.2 Tension superficielle

Au sein d'un liquide ou d'un solide isotrope, l'ensemble des forces de liaison auxquelles est soumis un atome ont une résultante nulle alors que celles qui agissent sur un atome situé à la surface libre ont une résultante f non nulle dirigée vers l'intérieur.

Par conséquent pour accroître l'aire de la surface libre il faut fournir un travail pour transférer les atomes de l'intérieur vers la surface, en s'opposant à la force f .

On admet que si la surface libre d'un système thermodynamique augmente de dA , son énergie libre augmente de :

$$dW = \sigma \cdot dA.$$

Le facteur de proportionnalité σ entre le travail dépense et l'accroissement de la surface se nomme « énergie de surface » ou « tension superficielle » et s'exprime en $J.m^{-2}$. [10]

1.4.3 Propriétés électriques

1.4.3.1 Conductibilité électrique

Le passage du courant dans un matériau, ou phénomène de conduction électrique est caractérisé par la conductivité définie par la relation :

$$\mathbf{P} = \sigma \mathbf{E} \dots \dots \dots (1)$$

Où P est la densité de courant et E le champ électrique appliqué.

Dans le cas d'un matériau isotrope comme le verre, σ (est un scalaire et l'inverse de σ est la résistivité ρ). Les unités correspondantes et sont respectivement m et $(\text{cm})^{-1}$.

La conductivité des verres dépend essentiellement de leur nature .A la température ambiante, la plupart des verres d'oxydes sont des isolants types et leurs conductivités varient de 10^{-17} à $10^{-5} (\text{cm})^{-1}$. [8]

1.4.4 Propriétés mécaniques

1.4.4.1 Dureté

La dureté est la résistance d'un solide à la pénétration d'une pointe, d'une bille d'un outil.

C'est à dire à la déformation de la surface. Dans l'industrie verrière, la dureté est une des propriétés les plus importantes, c'est une grandeur qui distingue entre les verres durs et les verres tendres.

Les verres à faible coefficient de dilatation se ramollissent à température élevée (verres durs) alors que les verres à coefficient de dilatation élevée (supérieur à 50.10^{-7}) se ramollissent à température relativement basse (verres tendres).

Les différentes méthodes permettant de classer les verres sont basées sur les résultats des essais : rayures, abrasion, empreinte reposent sur des principes différents. D'autres essais tel que celui du célérimètre ont été faits pour établir un classement plus précis.

De façon générale, le classement 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. [8]

1.4.4.2 Densité

La densité du verre est de 2,5, soit une masse de 2,5 kg par m² et par mm d'épaisseur pour les vitrages plans. La masse volumique, exprimée dans le système d'unités légal, est de 2 500 kg/m³. Un m² de verre 4mm a donc une masse de 10 kg. [8]

1.4.4.3 Résistance à la compression

La résistance du verre à la compression est très élevée : 1000 N/mm² ou 1 000MPa. Ceci signifie que, pour briser un cube de verre de 1 cm de côté, la charge nécessaire est de l'ordre de 10 tonnes. [8]

1.4.4.4 Résistance à la flexion

Un vitrage soumis à la flexion a une face en compression et une face en extension. La résistance à la rupture en flexion est de l'ordre de : 40 MPa (N/mm²) pour un verre float recuit ; 120 à 200 MPa (N/mm²) pour un verre trempé (suivant épaisseur, façonnage des bords et type d'ouvrage). La valeur élevée de la résistance du verre trempé (SGG SECURIT) est due au fait que son traitement met les faces du vitrage en forte compression. [8]

1.4.4.5 Élasticité

Un corps solide subit une déformation sous l'action d'une force de déformation. Si cette déformation disparaît par suppression de la force, le corps est appelé élastique. La loi de HOOK exprime que la déformation D est proportionnelle à la contrainte σ appliquée.

$$\sigma = E.D..... (2)$$

Le verre est un matériau parfaitement élastique : il ne présente jamais de déformation permanente. Il est cependant fragile, c'est-à-dire que, soumis à une flexion croissante, il casse sans présenter de signes précurseurs. [8]

1.4.4.6 Module de Young E

Ce module exprime la force de traction qu'il faudrait théoriquement appliquer à une éprouvette de verre pour lui communiquer un allongement égal à sa longueur initiale. Il s'exprime en force par unité de surface. Pour le verre, selon les normes européennes :

$$E = 7 \times 10^{10} \text{ Pa} = 70 \text{ GPa} \dots\dots\dots (3) \text{ [8]}$$

1.4.4.7 Coefficient de Poisson

Lorsqu'une éprouvette subit un allongement sous l'influence d'une contrainte mécanique, on constate un rétrécissement de sa section. Le coefficient de Poisson ν est le rapport entre le rétrécissement unitaire sur une direction perpendiculaire au sens de l'effort et l'allongement unitaire dans la direction de l'effort. Pour les vitrages du bâtiment, la valeur du coefficient ν est de 0,2. [8]

1.4.5 Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques sont directement liées aux changements de température. Ce sont essentiellement : la chaleur spécifique, le coefficient de dilatation thermique et la conductivité thermique. [8]

1.4.5.1 Chaleur massique

Dans la pratique, la grandeur la plus utile est la chaleur massique c qui est la quantité de chaleur qu'il faut apporter à un kilogramme de la substance pour élever de un degré sa température.

La chaleur massique c varie peu d'un verre à l'autre ; pour un verre sodo-calcique Au-dessous TG, c varie en fonction de la température suivant l'équation empirique :

$$c = 909,81 + 0,34682 T - 1,7641.107 T^{-2} \text{ [8]}$$

C : étant exprimé en $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et T en K. A 300 K on trouve $c = 818 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

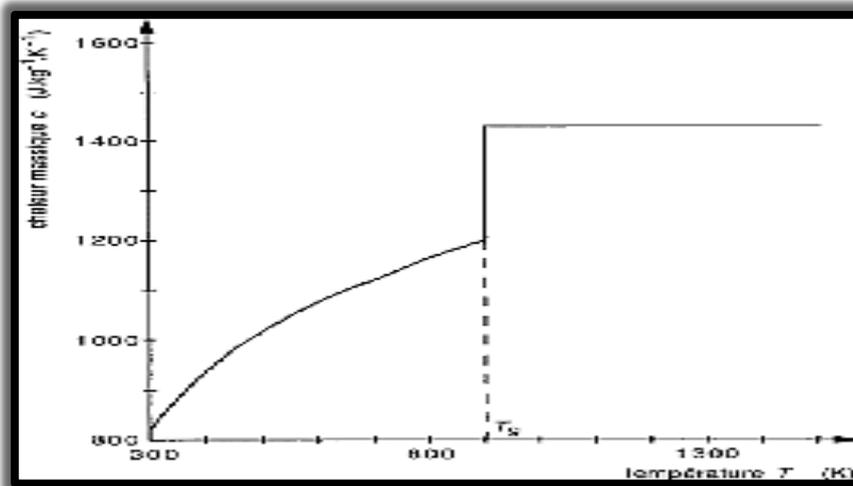


Figure I.3 : Chaleur spécifique d'un verre sodo-calcique en fonction de la température

1.4.5.2 Conductivité thermique

La conductivité thermique mesure la capacité d'un matériau conduire la chaleur. Elle définit comme le rapport du flux de chaleur au gradient de température. Elle est mesurée en joules par seconde par mètre carré de surface d'un corps pour une différence de température de 1°C par 1 mètre d'épaisseur. $[\text{J/m.s.c}]$.

La conductivité thermique d'un verre à la température ambiante est relativement faible elle est d'environ : 2.926 à 5.434 kJ/m.s.c . [8]

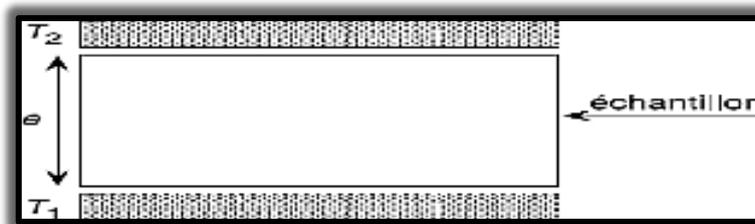


Figure I.4 dispositif pour la mesure de la conductivité thermique.

1.4.5.3 Dilatation thermique

La dilatation thermique d'un verre joue un grand rôle dans sa résistance au changement de température. Elle dépend beaucoup de la composition en oxydes, on peut en calculer approximativement la valeur à partir de la composition chimique. Actuellement elle est mesurée à l'aide de dilatomètre. [8]

Tableau 1.2 Dilatation thermique de quelques verres.

Type du verre	α °C 10 ⁻⁷
verre plat	80-90.
Verre borosilicate	80
Vycore	8

1.4.6 Propriétés optiques

1.4.6.1 Transparence

La transparence d'un verre est une notion liée à la transmission optique définie par la loi de Beer Lambert :

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\alpha x} \dots\dots\dots (4)$$

Avec I_0 intensité d'un rayon entrant dans un volume, défini à l'intérieur du verre, d'épaisseur x , I intensité du rayon émergeant. α est le coefficient d'absorption qui est relié à l'indice d'absorption K par :

$$\alpha = \frac{4\pi}{\lambda} k(\lambda) \dots\dots\dots (5)$$

Si la transmission est mesurée au travers d'un volume de matière, l'intensité transmise est plus faible en raison des pertes par réflexion sur les faces d'entrée et de sortie. Dans le cas où le rayon lumineux entrant est sous incidence normale.

$$\frac{I}{I_0} = (1 - R^2) \exp(-\alpha x) \dots\dots\dots (6)$$

Où R exprime la réflexion :

$$R = \frac{(n' - 1)^2 + K^2}{(n' + 1)^2 + K^2} \dots\dots\dots (7)$$

n' : est le rapport entre l'indice de réfraction du verre et celui du milieu environnant. Dans le domaine du visible, K , qui a une très faible valeur, peut être négligé.

n et K sont respectivement les grandeurs réelles et imaginaires de l'indice de réfraction complexe

$$n^* = n - iK \dots\dots\dots (8)$$

Ces grandeurs sont les manifestations de l'interaction d'une onde électromagnétique avec des oscillateurs du réseau.

1.4.6.2 Indice de réfraction du verre

Il est calculé à partir de la formule :

$$n = \frac{c}{v} \dots \dots \dots (9)$$

Où c 'est la vitesse de la lumière dans le vide, v est la vitesse de la lumière dans le verre. Le verre étant un matériau diélectrique, l'indice de réfraction complexe est relié à la permittivité relative complexe.

$$n^2 = \epsilon_r \dots \dots \dots (10)$$

À l'aide de cette expression et de l'équation du mouvement pour un oscillateur harmonique simple, on peut calculer les évolutions de n et K en fonction de la fréquence

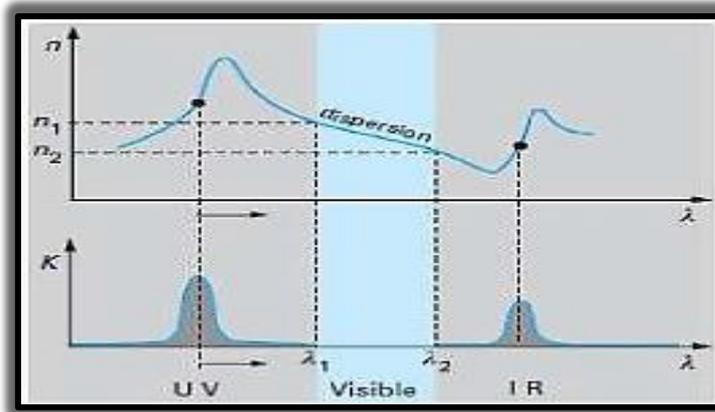


Figure 1.5 évolution de l'indice de réfraction et de l'absorption du verre en fonction de la fréquence ou de la longueur d'onde de la lumière incidente.

1.4.6.3 Transmission

La transmission est l'aptitude d'un verre à laisser passer la lumière. Le coefficient de transmission d'un verre de lunettes est le rapport entre la lumière émergente et la lumière incidente.

Le coefficient de transmission est plus élevé sur un verre de lunettes traité contre les reflets que sur un verre non traité.

$$\tau = \frac{I}{I_0} \dots \dots \dots (11)$$

L'indice de réfraction n varie brutalement lorsque la fréquence de la lumière incidente devient proche de celle correspondant à la résonance de l'oscillateur. Pour cette fréquence, l'absorption est maximale. La transmission optique décroît lorsque l'indice augmente en raison des réflexions déjà mentionnées. La perte par réflexion est particulièrement importante pour les verres de chalcogénures qui, bien que transparents dans le domaine de l'infrarouge, ont un indice élevé [8].

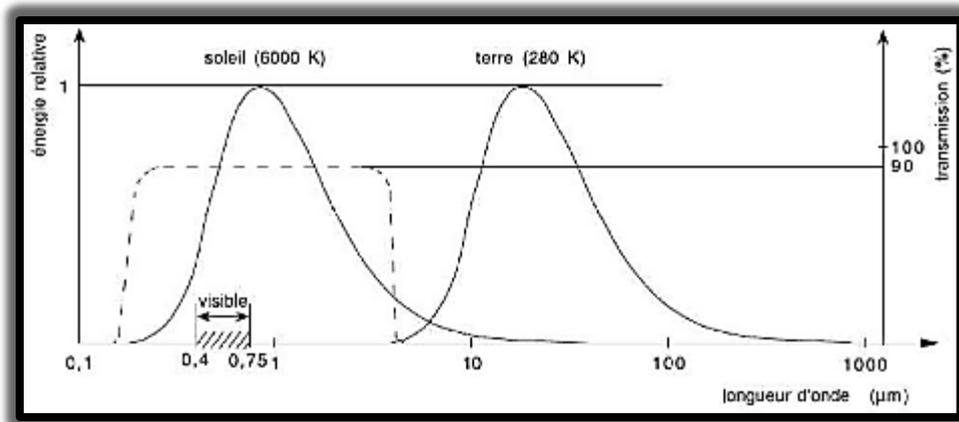


Figure I.06: Situation du spectre de transmission du verre par rapport aux spectres des rayonnements solaire et terrestre et à la lumière visible.

1.4.7 Propriétés chimiques

Les verres sont généralement considérés comme des matériaux résistants bien aux différents agents chimiques. Pour cette raison, ils sont utilisés à la fabrication des contenants destinés au stockage et au transport des denrées alimentaires, des produits chimiques et pharmaceutiques ; on les utilise généralement dans l'industrie, en milieu corrosif sous forme de : verre de regard, canalisation, appareils à distiller, ... etc.

Cependant, tous les verres n'ont pas la même résistance aux agents chimiques et il est indispensable d'arrêter un choix judicieux sur un verre, de bien connaître son comportement aux différentes attaques possibles à l'eau, alcaline et acide [8].

1.4.7.1 Mécanisme de l'attaque

L'eau est susceptible d'hydrolyser le verre puisque les ions H^+ prend la place des ions Na^+ ou Ca^{2+} qui passent en solution aqueuse. Il se forme à la surface du verre un gel de silice qui peut retenir les ions alcalins et place le verre dans les conditions d'attaque alcaline.

Les solutions alcalines peuvent dissoudre la silice elle-même, de sorte que l'attaque est plus rapide que celle de l'eau. La vitesse d'attaque est sensiblement constante et elle est une fonction exponentielle de la température et du pH.

L'acide fluorhydrique agit de la même façon. Les acides ordinaires dissolvent seulement les alcalins et alcalino-terreux, de sorte qu'ils ne peuvent attaquer le verre en profondeur qu'après avoir diffusé à travers le réseau de silice. Ce mécanisme explique le fait que la vitesse d'attaque décroît en fonction du temps.

1.4.7.2 Essai d'altérabilité

La vitesse de corrosion dépend d'un grand nombre de facteurs de sorte qu'un seul essai d'utilisation réelle peut enseigner exactement sur l'attaque, dans les conditions données. Toutefois, on peut évaluer la résistance moyenne des verres et les classer en les soumettant à des essais normalisés.

a- Attaque à l'eau

L'eau attaque le verre après un temps très long de contact. Il se produit un phénomène de dévitrification et extraction. L'extraction est la conséquence du contact de l'eau avec la surface du verre. L'attaque par l'eau est beaucoup plus forte aux températures élevées.

Les teneurs en CaO et en SiO₂ jouent également un rôle puisque la solubilité de ces corps à température élevée est supérieure à celle des alcalins. Les verres contenant B₂O₃ sont particulièrement résistants, mais ce sont les verres quartzes qui ont la résistance la plus élevée.

b- L'attaque acide

L'attaque du verre par les acides ne diffère pas de celle par l'eau aux basses températures au début de contact mais dans le cas général, après un certain temps on remarque qu'il y a formation de couches de protection à la surface du verre, il en résulte une diminution de l'attaque, c'est ainsi que l'acide sulfurique forme des couches de protection de BaSO₄ sur les verres contenant du baryum ou plomb.

c- L 'attaque alcaline

L'eau et l'acide extraient les substances du verre, tandis que les alcalis la dissolvent. Il n'y a pas formation de couches protectrices tout le verre est peu à peu désagrégé. L'action des alcalines caractéristiques des carbonates et des solutions d'ammoniaque est la plus forte, la dissolution de la surface du verre est 100 à 1000 fois plus grande que par l'eau. Les verres les plus sensibles aux alcalis sont ceux qui contiennent beaucoup de B_2O_3 et P_2O_5 ou ZnO et PbO mais peu de SiO_2 et de CaO .

Al_2O_3 augmente généralement la résistance aux alcalins. Un alcalin très faible agit comme l'eau. [7]

1.5 Types de verre

Les verres varient selon leurs compositions qui sont ajustées en fonction de l'usage auquel elles sont destinées, en tenant compte à la fois des performances obtenues et des prix de revient. On distingue, selon le domaine d'applications, plusieurs grandes familles (tableau 1.1) : [11]

Tableau I.3. Différentes catégories de verres industriels

Catégorie	Domaine typique de composition	Applications
Sodocalcique	$\text{SiO}_2, \text{CaO}, \text{Na}_2\text{O}$	Vitrage Bouteilles Flaconnage Gobeletterie
Borosilicate	$\text{SiO}_2, \text{B}_2\text{O}_3, \text{Na}_2\text{O}$	Pharmacie Culinaire Laboratoire
Alumino-silicate	$\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{CaO}, \text{B}_2\text{O}_3$	Fibres de renforcement
Verre au plomb	$\text{SiO}_2, \text{PbO}, \text{K}_2\text{O}$	Verrerie d'art Flaconnage de luxe Écrans de protection
Silice	SiO_2	Fibres optiques
Zircone	$\text{SiO}_2, \text{ZrO}_2, \text{Na}_2\text{O}$	Renforcement du ciment
Bioverres	$\text{Na}_2\text{O}, \text{CaO}, \text{SiO}_2, \text{P}_2\text{O}_5$	Médicales
Verres fluorés	ZrF_4 combiné à d'autres fluorures	Fibres optiques de courtes distances
Vitrocéramique	$\text{Li}_2\text{O}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2$	Culinaires Optiques
Chalcogénures	S, Se, Te, mélangés à Ge, Si, Sb, As et/ou halogènes	Optiques infrarouge
Métallique	Métal de transition + non-métal ou deux métaux de rayons atomiques différents	Renforcement béton Industrie électrique

1.5.1 Verres de borosilicatées

Le verre borosilicate est un verre contenant entre 7 et 15 % d'oxyde de bore. Il présente une dilatation équivalant à un tiers à deux tiers de celle du verre silico-sodo-calcique. Il possède également une excellente résistance aux acides. Ce type de verre est notamment utilisé pour les protections de feu ouvert.

Vers 1880, Otto Schott à la faveur des nombreux essais qu'il effectuait sur les borosilicates pour élargir la gamme des verres d'optique, se rendit compte que l'introduction de B_2O_3 dans la composition améliorerait sensiblement la résistance du verre au choc thermique et aux attaques chimiques.

En 1887, il proposa des manchons en verre borosilicate pour les lampes Auer. Un peu plus tard, Corning développa un verre résistant aux chocs thermiques pour les globes des lanternes des chemins de fer US.

Par rapport à un silicate alcalin, la composition retenue consistait remplacer une grande partie des alcalins par B_2O_3 et un peu d' Al_2O_3 . Le coefficient de dilatation du verre

de composition : 81 % SiO_2 , 12 % B_2O_3 , 2 % Al_2O_3 , 5 % ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) vaut $32 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ soit trois fois moins qu'un verre sodocalcique.

Cette propriété remarquable résulte de la faible proportion d'oxygènes non-pontant. Initialement, Corning développa cette composition pour répondre au marché des séparateurs de bacs d'accumulateur, mais plus tard, J. Littleton, dans cette société, démontra l'intérêt de ce verre, baptisé Pyrex, en verreries culinaire et de laboratoire.

Par suite de leur excellente résistance à la corrosion, un autre grand domaine d'application des verres de borosilicate concerne la chimie et la pharmacie. Les flacons en verre ne doivent pas relâcher d'ions alcalins dans le liquide qu'ils contiennent, même en autoclave.

Le « verre neutre », souvent utilisé en pharmacie, a pour composition pondérale: 62 % SiO_2 , 12 % B_2O_3 , 6 % Al_2O_3 , 2 % BaO , 1 % ZnO et 10 % ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$).

Dans les laboratoires de chimie, les calcinations sont souvent effectuées dans des tubes de combustion. Ces derniers doivent être constitués d'un verre à T_g élevée.

Il s'agit d'un borosilicate dans la composition duquel on a ajouté de l'alumine et des alcalino terreux et réduit le taux d'alcalins : 55 % SiO_2 , 8 % B_2O_3 , 21 % Al_2O_3 , 5 % CaO , 9 % MgO , 2 % Na_2O .

On obtient ainsi une T_g à $730 \text{ }^\circ\text{C}$, à comparer à $560 \text{ }^\circ\text{C}$ pour le Pyrex. [11]

1.5.2 Verres d'aluminosilicates

A la base, on a développé ce verre dans le but de réaliser un tissu isolant, à faible perte diélectrique et résistant à la chaleur et aux attaques hydrolytiques pour des appareillages électriques de puissance (générateurs, moteurs, transformateurs).

On peut retrouver une composition voisine de l'eutectique 22% SiO_2 , 3% Al_2O_3 , 9% CaO chez la firme américaine Owens-Corning Fibre Glass dont le liquide est à $1170 \text{ }^\circ\text{C}$. Cependant, environ 7 % de B_2O_3 furent ajoutés pour pouvoir l'élaborer sous forme de fibres vers $1150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Les fibres de verre d'aluminosilicates peuvent être mélangées à une résine de synthèse (thermodurcissable ou thermoplastique) pour en renforcer les propriétés mécaniques.

D'ailleurs ces fibres de verre-résine sont largement imputrescibles et incombustibles. Ils connaissent de ce fait de multiples applications dans les transports, le bâtiment et la marine de plaisance.

Des performances mécaniques encore plus élevées sont obtenues avec des verres du système SiO_2 , MgO , Al_2O_3 . Leurs compositions industrielles sont voisines de l'eutectique 65% SiO_2 , 25% Al_2O_3 , 10% MgO dont le liquide est à 1475 °C.

Le remplacement de CaO par MgO augmente considérablement la résistance à la traction. En outre la résistance à la corrosion est remarquable. Mais leurs applications sont limitées du fait de la température nécessaire à leur élaboration atteint les 1700°C. [11]

1.5.3 Verre au plomb

Il s'agit de vitrages ayant une teneur en plomb de l'ordre de 70 %, ce qui permet une forte atténuation des rayons X et γ . Ils sont sensibles à l'oxydation et il faut donc éviter leur contact avec l'eau et les détergents.

Leur masse volumique équivaut environ au double de celle du verre classique. Ils sont utilisés pour les parois vitrées de salles de radiologie médicale ou industrielle. L'introduction d'oxyde de plomb dans la composition des verres remonte au XVII^{ème} siècle.

Le chimiste Thomas Percivall conçut un four qui utilisait le charbon, qui, lui, était abondant. Il était nécessaire, pour éviter que les fumées réductrices ne provoquent la coloration du verre, d'utiliser des creusets fermés.

Muni de cet outil, le verrier, George Ravenscroft, s'efforça de mettre au point un verre transparent pouvant rivaliser avec le cristal de Bohême, et moins tributaire des matières premières importées, notamment les cendres de plantes marines.

Plus fusible que le verre sodo-calcique, il était plus facile à travailler à chaud. Sa résistance à l'eau était satisfaisante à condition de limiter la teneur en potasse. En outre, son indice de réfraction élevé et sa forte dispersion lumineuse lui donnaient un éclat remarquable ; de plus, sa grande densité lui conférait une belle sonorité. Il s'imposa pour toutes les pièces de verrerie décorative.

La verrerie d'art n'est pas la seule à tirer parti des verts au plomb. Ils sont largement utilisés en optique instrumentale. On exploite également leur propriété d'absorption des rayonnements γ ou X.

On a d'abord réalisé avec ces verres des écrans de protection pour la radioscopie puis des hublots d'observation pour l'industrie nucléaire. Les enveloppes des tubes à rayons cathodiques doivent aussi absorber les rayons X émis par l'anticathode.

Les premiers tubes de télévision étaient entièrement formés de verre au plomb. Mais comme celui-ci jaunissait légèrement sous l'action des rayonnements, il a été remplacé, pour les écrans de télévision couleur, par des verres d'autres oxydes de métaux lourds: baryum et strontium. [11]

1.5.4 Verres à base de zircon

Dans le domaine du bâtiment et des travaux publics, il est apparu particulièrement intéressant de renforcer le ciment par des fibres de verre. La difficulté à surmonter était de trouver les compositions verrières résistant aux solutions fortement alcalines comme le sont les composés cimentaires.

Les meilleures compositions sont celles qui contiennent ZrO_2 . Un exemple de compromis entre les impératifs de prix de revient des matières premières et les conditions d'élaboration et de fibrage est représenté par la composition : 61,5 % SiO_2 , 1 % Al_2O_3 , 16 % Na_2O , 3% K_2O , 1,5 % CaO , 17 % ZrO_2 . [11]

1.5.5 Verres sodocalciques

Actuellement, la famille sodocalcique représente plus de 90 % des verres produits. La prédominance permanente de cette famille est naturellement liée aux raisons économiques :

- faible coût des matières premières et température modérée d'élaboration par comparaison avec la silice pure.
- La vente importante de ces verres est également liée au procédé de fabrication float

Dans une composition verrière, le rôle des oxydes alcalins est de former avec la silice des silicates à bas point de fusion. Mais les silicates alcalins ont un grave inconvénient : ils

sont solubles dans l'eau. Les silicates de calcium sont bien moins fusibles mais, en revanche, ils ont l'avantage de ne pas être solubles.

La baisse de la température de liquides est d'un double intérêt pratique : d'une part la température de fusion est abaissée, d'autre part on peut refroidir la fonte jusqu'à ce qu'elle ait la viscosité convenable pour le formage, sans risquer la cristallisation.

Il faut prendre garde de ne pas trop réduire la teneur de CaO de façon à limiter la solubilité du verre. On peut choisir par exemple : 74% SiO₂, 15% Na₂O, 11% CaO. La viscosité de cette composition est suffisamment basse pour permettre son élaboration à l'aide d'un feu de bois (1400 °C) et d'autre part elle est suffisamment élevée à 1100 °C (soit 100 °C au-dessus du liquide) pour commencer les opérations de formage. Enfin la résistance à l'eau de ce verre est suffisante pour la gobeletterie, les bouteilles et le vitrage.

Les verres sodo-calciques modernes contiennent d'autres oxydes en petites quantités notamment Al₂O₃ qui, à partir de quelques dixièmes de %, améliore sensiblement la résistance à l'eau. Un autre oxyde qu'on trouve toujours dans le verre plat est MgO qui, lorsqu'il remplace partiellement CaO, réduit notablement la température de liquide. Cela permet de disposer d'un liquide très visqueux dès le début du formage. [11, 12]

Chapitre II

Présentation du lieu de stage

Chapitre II : Présentation du lieu de stage

2.1 Description général de MFG CEVITAL

Méditerranéen float glass par abréviation MFG est une filiale de CEVITAL premier groupe industriel privé en Algérie

MFG a installé la plus importante ligne de production de verre plat en Afrique avec une capacité de production de 600 tonnes/jours

MFG profite d'une parfaite localisation au niveau du site de Lrabaa a 30 km d'Alger ce qui représente moins d'une heure de route à l'aéroport international et du port d'Alger

MFG, inaugurée le 28 mai 2007 confirme l'intérêt porté à cette industrie au plus haut niveau

Depuis septembre 2007 l'entreprise travaille avec trois équipes (3*8) pour atteindre une production de 760000 tonnes/jours [13].

2.1.1 Caractéristiques principales:

Le tableau suivant représenté la caractéristique principales du verre MFG [13]

Tableau II.1 Caractéristiques principales du verre MFG

Capacité de production	600 tonnes
Jours/Localisation	Larabaa Blida
Nature de l'activité	Production du verre
Superficie du terrain	30 hectares
Longueur de la ligne	844m
Effectif personnel	750 ouvriers
Electricité	16000 MVA
Gaz naturel	16000 m ³ /h
Eau	140 m ³ /h
Hydrogéné	130 m ³ /h
Azote nitrogène	1600 m ³ /h
Cout global	57M.USD

2.1.2 Domaine d'activité

Le domaine d'activité MFG est relatif au développement de la production et la commercialisation de verre plat clair multi dimension, verre feuilleté, double vitrage, couche mince, verre colorée et pyrolytique [13].

2.1.3 Produit Fini

MFG offre des produits de qualité qui répondent parfaitement aux exigences des concepteurs et a l'évolution des tendances tant pour bâtiments que pour l'industrie automobile ou encore la décoration et l'ameublement

En effet, MFG répond aux attentes de ses clients pour les applications les plus exigeantes en temps de design, de sécurité, d'isolation, de confort et de maîtrise l'énergie avec une gamme riche de verre plat clair allant de 03 à 12 mm d'épaisseur en dimension PLF, DLF et ½ DLF [13].

2.1.4 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 [13].

2.1.6 MFG entreprise durable

Dans la continuité des démarches engagées depuis sa création MFG a encore renforcées les actions visant à garantir la satisfaction de ses clients, le respect de l'environnement et l'hygiène et sécurité de ses employés

MFG consacre toutes ses efforts en vue de mettre sur le marché un produit de qualité et ce par l'aboutissement de la certification ISO et formalisation son engagement par la mise en place d'un système de management QHSE (qualité, hygiène, sécurité environnement)

Cette certification sera en conformité aux différents référentiels internationaux : ISO 9001 : 2000 pour la qualité, ISO 14001 : 2004 pour l'environnement et OHSAS 18001 : 2007

pour la santé et la sécurité [13].

2.1.7 MFG développement

Dans le cadre de l'extension de ces capacités de production, MFG envisage de réaliser une 2^{ème} ligne d'une capacité de 800 tonnes/jours. 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 et 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 400 tonnes/jours 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 [13].

1.5.6 Ateliers de MFG

1. matières premières.
2. ligne de fabrication de verre float.
3. station de fabrication N₂.
4. station de fabrication de H₂.
5. station d'épuration d'eau.
6. station de gaz naturel (GN).
7. station électrique HT.
8. station GPL.
9. Verre a couche (couche mancie).
10. Verre feuilleté
11. Verre électroménager.
12. Station traitement de sable

Chapitre III

*Etapas de fabrication
du verre plat*

Chapitre III : Etapes de fabrication du verre plat

3.1 Définition du verre float

C'est en 1959 qu'Alastair Pilkington, développa le procédé de fabrication du verre float. Ce fut le pas décisif vers un système de fabrication économique étant donné que les traitements de la surface (doucissage, polissage) du ruban de verre sont des opérations coûteuses et nécessitent de lourds investissements. Actuellement le procédé float est le plus utilisé pour produire du verre plat de haute qualité au niveau mondial, il remplace quasi intégralement les techniques d'étirages [10,11].

Le verre float est un verre de silicate sodo-calcique plan, transparent, clair ou coloré et obtenu par le procédé de fabrication float, ce procédé consiste à déverser le verre à la sortie du four sur un bain d'étain en fusion permettant ainsi de produire des plaques de verre de grande qualité dotées de surfaces absolument planes parallèles et polies [14, 15, 16] (Figure III.1). [14]



Figure III.1. Photo du verre float de la société (MFG) [13].

3.2 Applications du verre float

Le verre plat est le produit de base de MFG destiné principalement aux secteurs suivants [14,17]:

- Bâtiments telles que les façades, les fenêtres, de devantures de magasin, de toitures, de vitrines d'exposition et d'aménagements intérieurs dans le cadre de magasins ou d'appartements et d'autres meubles en verre.
- Automobile.
- Electroménager



Figure III.2 photo Quelques applications du verre float fabriqué par la MFG : (a) façade, (b) fenêtre, (c) verrière, (d) portede four [13].

3.3 Présentation générale du procédé

Le procédé "float" constitue un pas technologique très important dans la fabrication du verre plat. Ce procédé, qui se démarque radicalement de ses prédécesseurs, a été inventé par Alastair Pilkington en 1952.

Il s'agit en effet d'un procédé complet qui rassemble les différentes étapes de la production en une seule et même unité de production d'une longueur moyenne de 400 m.

Généralisé dans les années soixante, le procédé "float" a été adopté depuis comme méthode standard pour la fabrication du verre plat de haute qualité.

Cette technique consiste à faire flotter le ruban de verre en fusion sur un bain d'étain liquide. Grâce à cette méthode, le verre fabriqué est parfaitement plat. Il n'a plus besoin de polissage ou de doucissage et peut donc être directement découpé. Voici un schéma global représentant le fonctionnement du procédé :

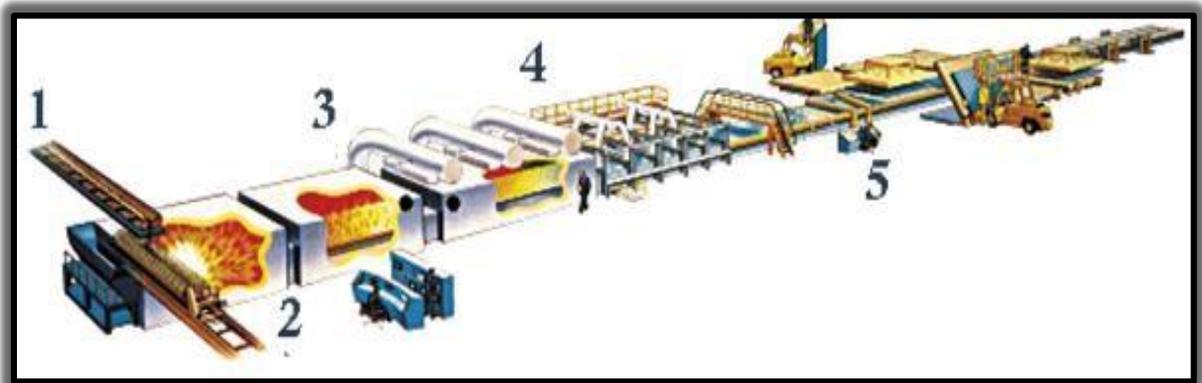


Figure III.3: Schéma de la ligne MFG. [18]

Chaque numéro fait référence à une étape de la fabrication. Nous allons donc les détailler dans cet ordre :

3.3.1 Matières premières utilisées pour la fabrication du verre

- **Le sable (300 tonnes/jours)**

Le sable est la principale matière première 70% de la masse totale du verre, intervenant dans la fabrication du verre. Car il constitue la plus importante source de SiO_2 . Il s'agit d'une substance naturelle et courante.

Le point de fusion du sable est trop élevé. Pour que la fusion soit économique, il faut ajouter

un fondant, tel que l'oxyde de sodium, pour réduire la température de fusion. [18]

- **Carbonate de soude (100 tonnes/jours)**

Il entrait autrefois dans la composition sous forme de cendres de plantes marines (ex : la salicorne) ou de nitre (grec = nitrons). Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et sa résistance aux agents atmosphériques ainsi que le coefficient de dilatation. Il est plus utilisé pour le verre industriel que pour le verre soufflé car il doit être constamment réchauffé lors du façonnage. [18]

- **Dolomie (80 tonnes/jours)**

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

Broyée, puis calibrée, elle sert à introduire dans la composition ces deux éléments qui permettent d'ajuster les propriétés du verre. [18]

- **Calcaire (20 tonnes/jours)**

Le calcaire, roche constituée de carbonate de calcium, permet d'ajuster la teneur en calcium du verre produit.

Les exigences qualité sont sensiblement les mêmes que pour la dolomie en ce qui concerne la granulométrie: minimum de grains supérieurs à 2 mm et minimum de fines < 100 p. [18]

- **Feldspath (20 tonnes/jours)**

Silicate hexa silicique d'aluminium ; Le feldspath est une matière première difficilement fusible.

La granulométrie doit être inférieure à 600 µm pour éviter tout problème de qualité du produit fini. Il est ajouté afin d'améliorer la résistance chimique et d'augmenter la viscosité à basse température. [18]

- **Sulfate de soude (5 tonnes/jours)**

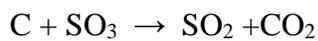
Il constituait dans le passé la source première d'oxyde de sodium dans l'industrie du Verre.

Il a été remplacé par le carbonate de sodium depuis la fabrication de ce dernier par le procédé SOLVAY.

Toutefois, il est encore présent dans la composition en petite quantité compte-tenu de son rôle dans les phénomènes de fusion et d'affinage. [18]

- **Charbon (140 kg/jours)**

Le charbon était utilisé comme réducteur intervenant dans les phénomènes de fusion par réaction avec le sulfate de sodium [18]



- **Oxyde de fer (120 kg/jours)**

C'est un stabilisant et un colorant souvent contenu dans les roches naturelles, il donne une teinte verdâtre [18]

- **Calcin (125 tonnes/jours)**

Une matière première de plus en plus importante, dans la fabrication du verre, à la fois issu de la fabrication (recyclage du verre), dit interne ou acheté dit, extérieur.

Le calcin nécessite une énergie de fusion inférieure à celle des matières premières. [18]

Le tableau suivant montre les sources de matières premières

Tableau II .1 : Sources de matières premières de MFG. [18]

N°	matières premières	Provenance
1	Sable	Local, Tébessa
2	Carbonates de sodium	USA
3	Dolomie	Local, borj bou-aréréj
4	Calcaire	Local, khroub (Constantine)
5	Feldspath	Espagne
6	Sulfate de sodium	Espagne
7	Charbon	Espagne
8	Oxyde de fer	Espagne
9	Calcin	Interne, MFG

- Critères d'acceptation des matières premières

En prendre en considération les critères d'acceptation des matières premières suivantes :

- Analyse chimique
- Granulométrie
- Humidité
- Impuretés

3.3.2 Four de fusion (régénérateur)

Le four de fusion Construit en briques réfractaires ; le four contient jusqu'à 2000 tonnes de verre fondu à 1550 °C la température est contrôlée en permanence.

La fusion du verre pour la ligne « float » sera assurée par un four à régénérateur à six brûleurs transversaux.

Le verre fondu est affiné et homogénéisé, est ensuite conditionné a température contrôlée avant d'arriver au bain d'étain, pour assurer un bon fonctionnement le four est équipé de dispositifs automatique de mesure d'enregistrement et régulation de pression et niveau de verre, d'un système de minuterie et d'inversion automatique de la flamme.

Les fumées sont évacuées par tirage naturel par une cheminée de 82.5 mètres

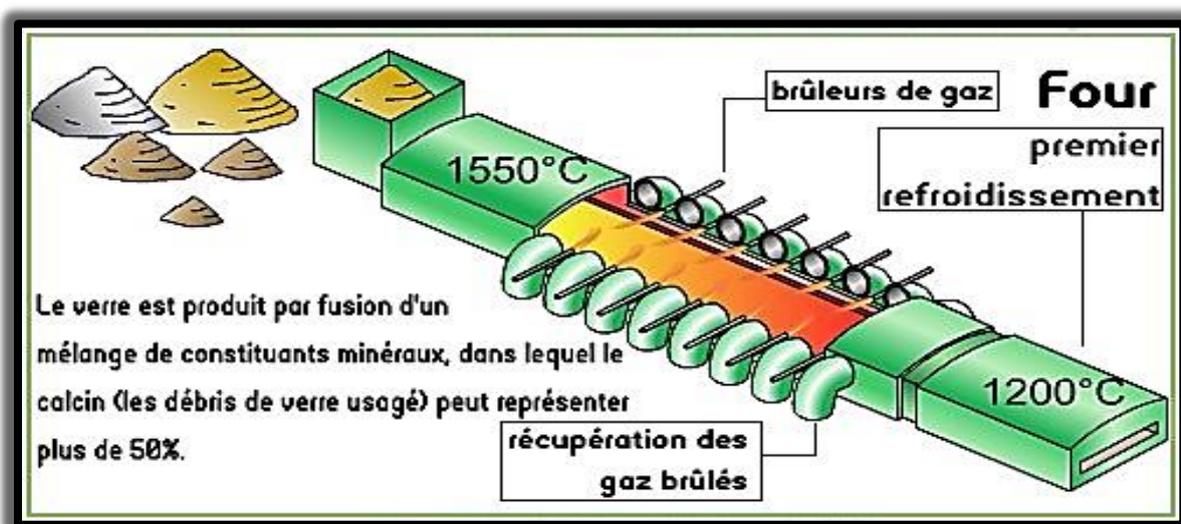


Figure III .4 : Vue d'en haut du four de fusion [18]

Le mélange de matières premières est envoyé vers le four de fusion dont la température du point chaud atteint 1575 °C environ. Les matériaux solides introduits se transforment en un liquide homogène le verre fondu après passage à travers différentes transformations physico-chimiques.

Le type de four utilisé pour ce fait est un four à 06 régénérateurs transversaux. Par alternance, tous les brûleurs d'un même côté fonctionnent et les fumées s'échappent du côté opposé. On inverse le sens toutes les vingtaines de minutes. Le verre est ensuite refroidi jusqu'à la température de façonnage qui est de 1100 °C.

A la sortie du four, le verre fondu est coulé sur un bain d'étain en fusion. Le verre flottant sur une surface liquide plane, est étiré en un ruban à faces parallèles. Sur les bords du ruban, des roues dentées (*top-Rolls*) étirent ou repoussent le verre latéralement, afin d'obtenir l'épaisseur désirée.

Actuellement les épaisseurs possibles vont de 0,5 mm à 25 mm. [18]

Caractéristiques du four

.Le four MFG caractérisé par les suivants :

- Four à régénérateurs latéraux (06 de chaque côté).
- Longueur : 63 m, largeur : 30 m
- Quantité du verre en fusion : 2 000 tonnes.
- Température maximale : 1500 ° C, Température de sortie : 1200 ° C
- Durée de vie du four : 10 ans. [18]

Conception du four

Ces dispositifs permettent de recycler efficacement l'énergie de combustion amené par les gaz brûlés (d'où son nom régénérateur). Il est constitué essentiellement de briques réfractaires qui résistent à la chaleur comme à la corrosion, d'une couche externe de briques d'alumine qui minimisent les pertes de chaleur et soutenu à l'aide d'une structure en acier refroidie en permanence.

Cette conception répond aux différentes étapes d'élaboration du verre, qui se décompose en différentes phases (fusion, Affinage, Conditionnement) auxquelles correspondent différentes zones :

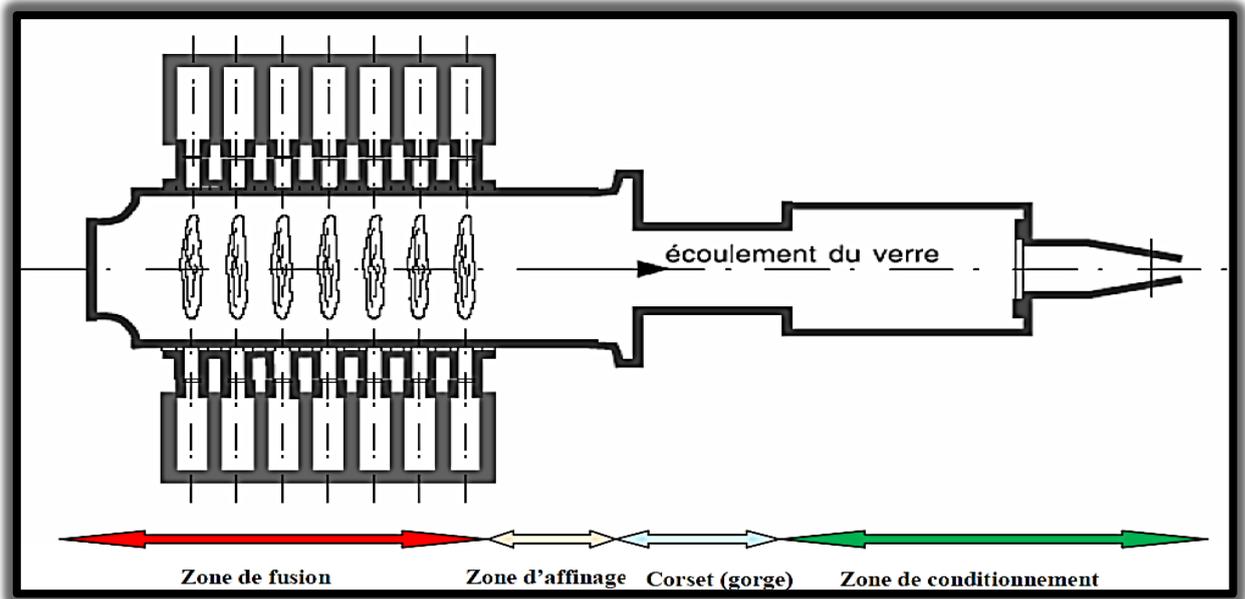


Figure III .5 : Schéma les différentes zones du four. [18]

3.3.2.1 Zone de fusion

Le lieu de transformation de la matière première en verre s'étale depuis l'enfournement jusqu'au dernier port. Il comporte plusieurs parties complémentaires entre elles (corps de fusion, colliers brûleurs, chambres régénératrices, système d'inversion, canaux principal et secondaires).

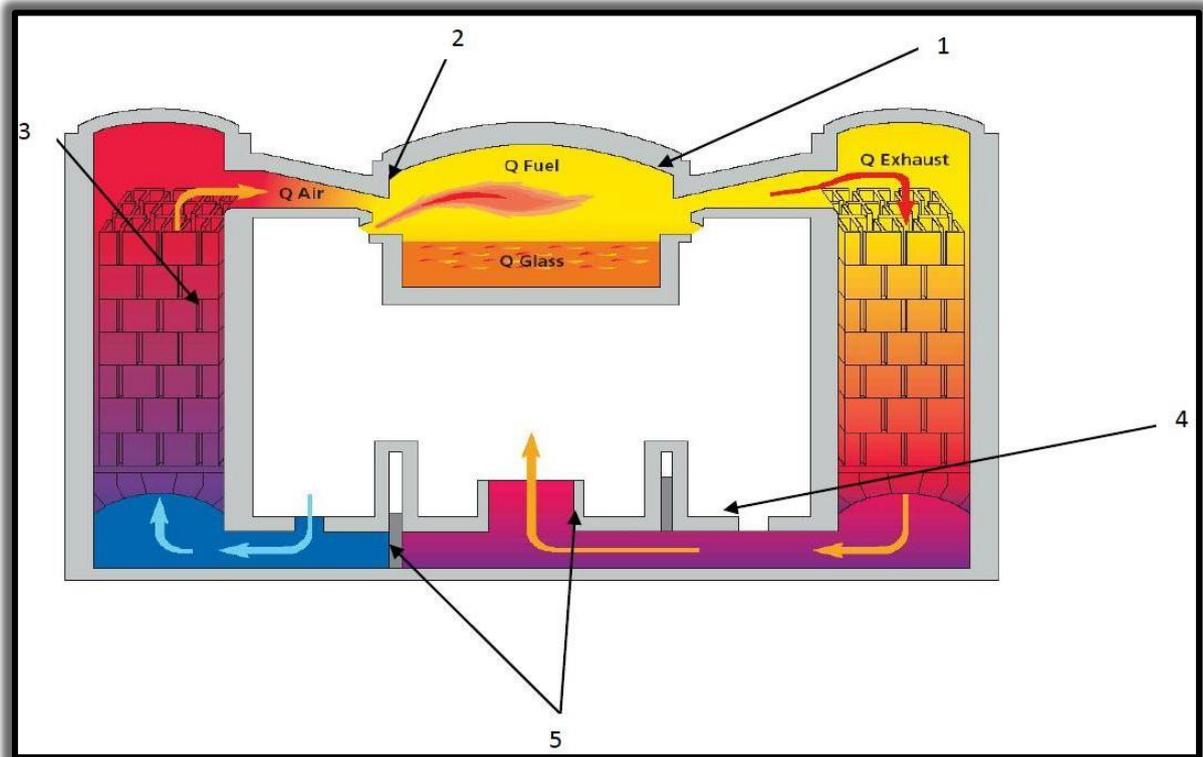


Figure III .6 : Schéma des différentes parties de la zone de fusion.

1. Corps du four
2. Colliers de brûleurs
3. Chambres régénératrices
4. Système d'inversion
Carneaux principal et secondaires [18]

- 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. Sur chaque côté, il y a six chambres de régénération où ports comportant 03 injecteurs à flamme horizontale et à haute pression contrairement au sixième port qui comporte deux injecteurs permettent l'introduction du CH_4 pour l'allumage des flammes qui peuvent atteindre une longueur de 8m, soit $\frac{3}{4}$ de la longueur du four

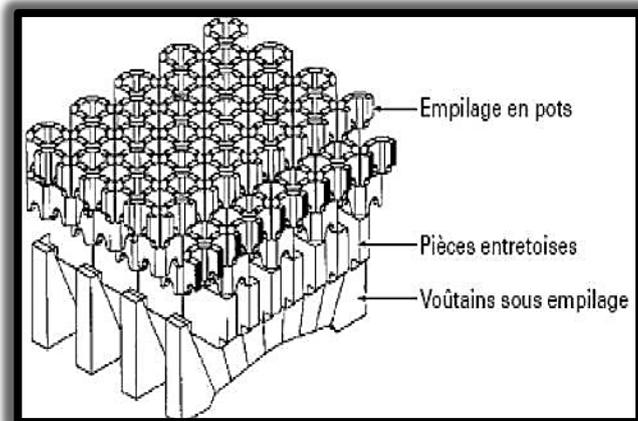
- Chambres régénératrices

Les chambres de régénération sont reliées au four par les colliers de brûleurs, qui sont conçu d'une couche interne de brique en silice et d'une couche externe de brique en alumine. Les colliers permettent la circulation de l'air (O_2) et l'évacuation des fumés vers l'extérieur. Les chambres de régénération sont conçues en briques d'empilage à l'intérieur qui supportent des températures atteignant les $1500^{\circ}C$.

Elles fonctionnent suivant l'allumage de la flamme et permettent l'alimentation de la flamme en O_2 de son côté. Dans le côté opposé, elles permettent d'évacuer la fumée et maintenir la brique chaude par la chaleur d'où le terme de régénérateur.

L'inversion est assurée par un système mécanique qui permet d'inverser la flamme de départ chaque 20 min.

Les fumées sont évacuées dans un long couloir appelé canal principal vers une cheminée d'une longueur de 82.5 mètres. [16]



(a)



(b)

Figure III.07 : (a) Schéma de brique d'empilage de la chambre, (b) photo de brique d'empilage de la chambre.

3.3.2.2 Zone d'affinage

La zone d'affinage, d'une longueur de 16 mètres, s'étale du dernier port jusqu'à la gorge. La paroi de la zone d'affinage est en brique AZS-36# (36% de Zr). Son rôle est le dégazage du verre, c'est-à-dire la libération des bulles d'air emprisonnées à l'intérieur comme O₂ et le CO₂. [16]

- La gorge

C'est une réduction intermédiaire entre la zone d'affinage et la zone de conditionnement. Elle permet le réglage du débit du verre.

Elle comporte un barrage pour stopper les impuretés qui flottent sur la surface du verre et sept (07) malaxeurs qui assurent l'homogénéisation du liquide. Les briques de paroi sont en AZS-33# (33% de Zr). [16]

3.3.2.3 Zone de conditionnement

Sur une longueur de 16mètres, elle s'étend de la gorge jusqu'au bain d'étain. Elle est aussi appelée zone de repos.

Son rôle est de conditionner le verre à une température de 1100 °C environ, pour pouvoir être façonné au bain d'étain.

Le réglage de la température se fait par injection d'air. La brique de paroi est en corindon en 95% (Al₂O₃). [16]

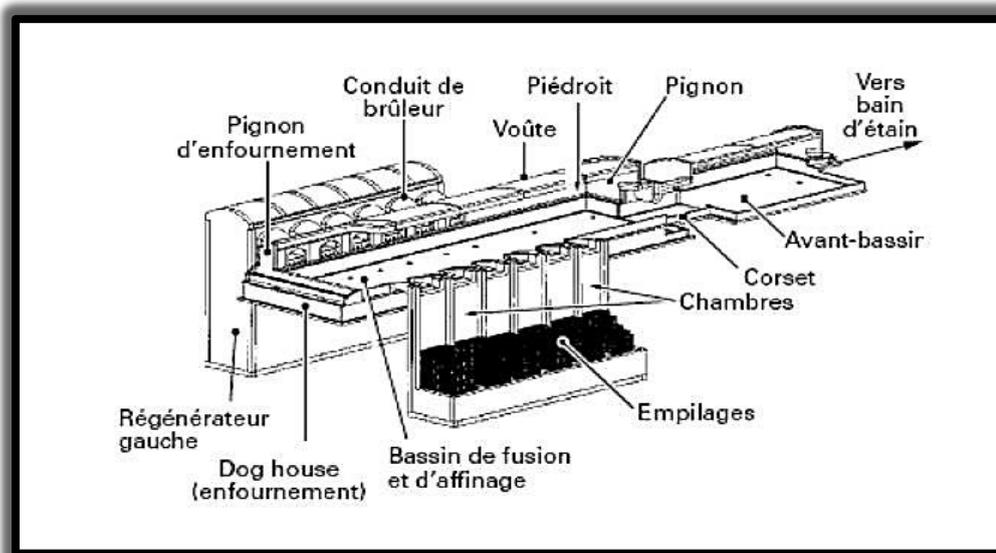


Figure III.08 : Schéma de four float à flamme transversale

- Enfournement

Les matières premières, après stockage dans des silos conditionnés (de telle manière qu'aucune pollution ni transformation (hydratation, prise en masse) ne soit possible), sont reprises puis pesées pour constituer le mélange vitrifiable.

Une fois pesée, ces dernières (sans calcin) sont acheminées vers un mélangeur pour obtenir une masse homogène constituant le mélange vitrifiable.

Le but de l'homogénéisation est de faciliter les réactions chimiques intervenant au niveau de la fusion, d'accélérer ainsi cette dernière et de permettre l'obtention d'un produit final lui aussi homogène.

Le mélange s'effectue en deux temps mélange de matières sèches et mélange des matières humides

L'ajout du calcin s'effectue au niveau de la trémie d'enfournement pour être ensuite enfourné dans le four de fusion (à l'aide des enfourneuses). [16]

- Processus de fusion du verre dans le four

C'est la transformation que subit la matière première qui est à base dans le four. Elle s'établit à une température entre 800 et 900 °C par :

a) Élimination de l'humidité :

C'est l'élimination de l'eau présente dans la matière première par vaporisation dans le premier port du four. [16]

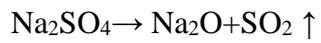
b) Dissolution des sels

La dissolution des sels qui composent la matière première est montrée au niveau des 3 premiers ports par les réactions suivantes:





380 °C environs



1200 °C environs

c) Transformation polymorphique

C'est les différentes transformations des structures moléculaires (tirade, rotation.....etc.) subies par un gradient élevé de température.

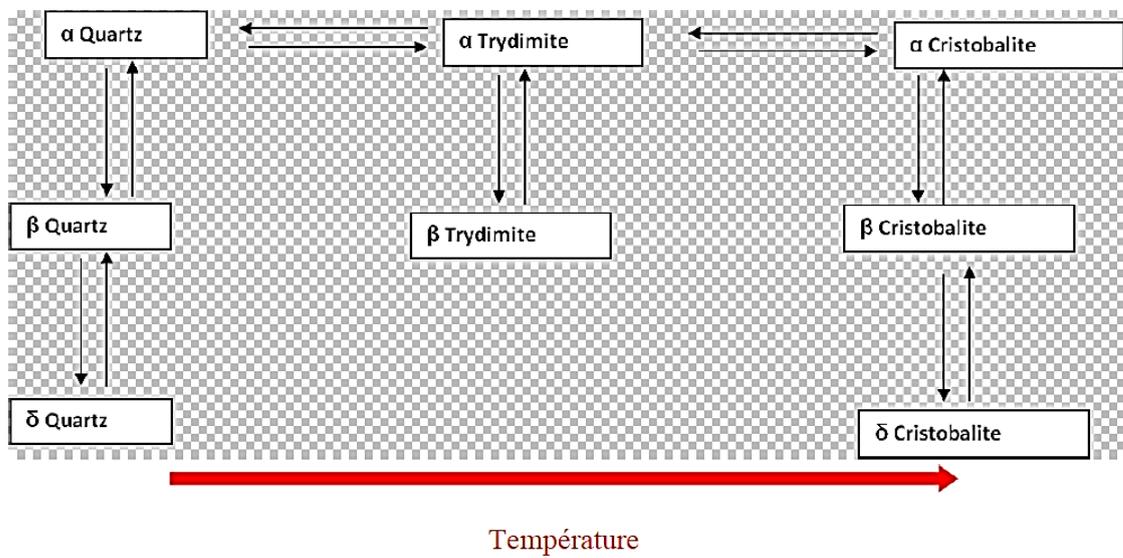
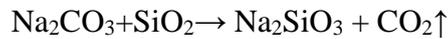


Figure III.09 : Schéma de Fränkel [16]

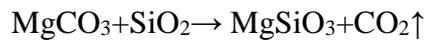
Il se forme alors les réactions suivantes :

- Pour Na₂CO₃ et de SiO₂ :

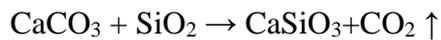


- Pour Na₂SO₄ et de SiO₂ : $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{SiO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{CO}_2 \uparrow + \text{SO}_2 \uparrow$

- Pour MgCO₃ et de SiO₂ :



- Pour CaCO₃ et de SiO₂ :



La formation des silicates comporte les cinq étapes suivantes:

❖ Formation des sels double

Elle se forme par fusion de deux sels ex : Na₂CO₃ et CaCO formant CaNa₂(CO₃)₂, quia pour rôle d'accélérer le procédé de fusion de la silice et de diminuer sa température de fusion.

❖ Formation du verre

C'est le passage de la matière de l'état solide à l'état liquide (fondu) qui se passe au niveau du 4^{ème} port à une température de 1575 °C environ.

Le processus de fusion des grains de la silice est très lent. La vitesse de formation de verre dépend de :

- la vitesse de fusion des grains de la silice;

- la vitesse de fusion des grains de la silice;
- la température de fusion;
- la composition de verre;
- la granulométrie des sables.

❖ L'affinage du verre

Affinage = dégagement des bulles gazeuses après la fusion

C'est le dégazage du liquide des bulles de gaz emprisonnées à l'intérieur à une température entre 1400 et 1500 °C.

Ces bulles proviennent de :

- Air de combustion ;
- Des gaz dégagé pendant la fusion ;
- De la variation de la compositions chimique par l'influence de la température ;
- Des sels volatile (borate, chlorure, fluorure, sulfate, S, H₂, H₂S) ;
- Par le contact du verre avec les parois, pots, cuves ;
- Par inclusion d'un solide dans le verre.

$$V = \frac{2}{9} x \frac{r^2 d}{\delta} \dots\dots\dots (12)$$

Elle monte suivant la loi de Stokes qui dit

Plus le rayon est grand, plus la vitesse de dégagement est grande.[18]

❖ Homogénéisation

- Par courant de convection naturel qui se fait par différence de densité suivant la température ;
- Par mouvement d'assonions des bulles (affinage) ;
 - Par action mécanique : par brassage mécanique avec les mélangeurs au niveau de la gorge ;
- Par diffusion très lente.[18]

❖ **Refroidissement**

Il consiste à amener le verre à la viscosité exigée pour la mise en forme, ce qui permet en outre la dissolution des bulles restantes suivant le procédé de formage.[18]

3.3.2 Le bain d'étain

Le bain d'étain est un équipement-clé de formage de verre flottant, sa structure peut diviser dans l'ensemble en trois parties : le bout d'entrée, la partie d'ossature et le bout de sortie

- **Le bout d'entrée** : Il s'appelle aussi le canal et la goulotte qui est le passage reliant le bout du four de fusion et le bain d'étain. Il est constitué de canal, de goulotte, de voûte inclinée, de voûte horizontale, de mur de four et de brique de couvercle. La vanne à coulisse de sécurité et de débit est prévue sur le canal et la goulotte.
- **partie d'ossature** : La forme du bain d'étain se divise dans l'ensemble en deux comportements largeur équivalente et largeur avant et étroite arrière, on emploie généralement à présent la dernière. La partie d'ossature appelée la structure principale du bain d'étain comprend le sol du bain, le mur de four, le couvercle, la structure métallique, ... etc.
- **bout de sortie** : Un tronçon d'installation thermique entre le bain d'étain et l'étenderie appelé le bout de sortie ou « lift Out Rolls » dont l'organe dépend dans l'ensemble de l'herméticité/étanchéité à l'air du bain d'étain. [12]

La (Figure III.10) ci-dessous présente la structure de lift Out R

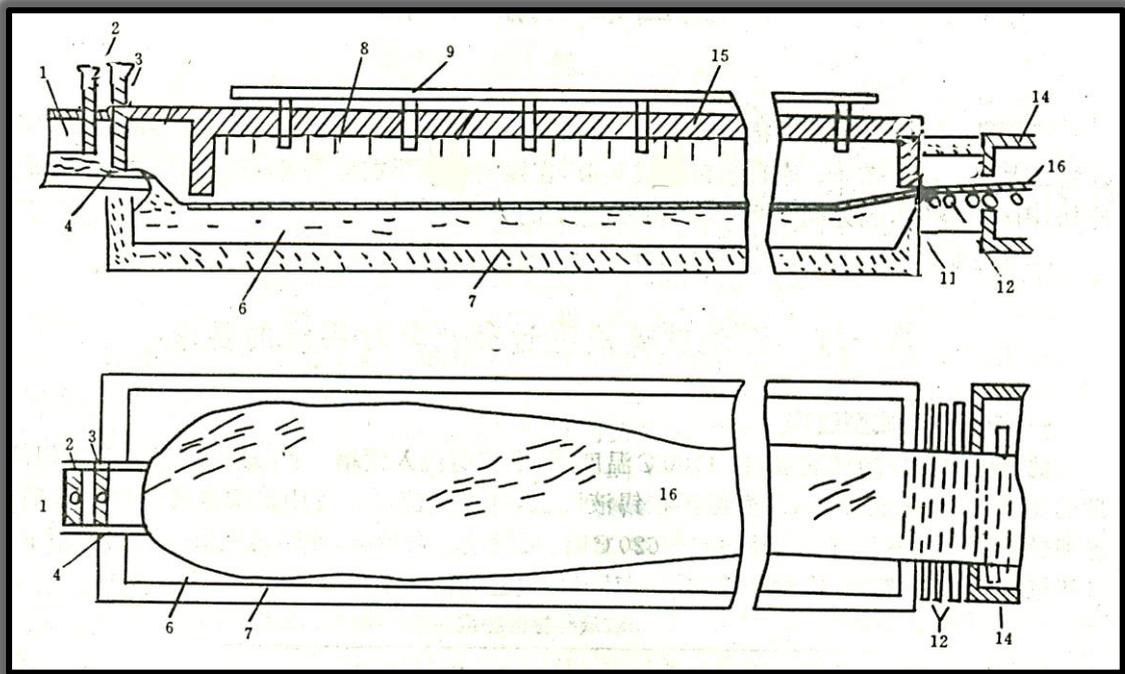


Figure III.10 : Schéma d'un bain d'étain [12]

1. Canal
2. Tweel obturatrice
3. Tweel régulatrice
4. Spout-lip
5. liquide d'étain
6. sole du bain d'étain
7. réchauffage électrique supérieur du bain d'étain
8. tuyauterie de gaz de protection
9. sortie du bain d'étain
10. rouleau t'entraînement de lift Out Rolls
11. étenderie
12. couvercle du bain d'étain
13. ruban de verre

- Caractéristiques

Le bain d'étain de MFG caractérisé par les suivants :

- Longueur totale : 64 m
 - Température du verre à l'entrée : $1100^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$
 - Température du verre à la sortie : $600^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
 - Quantité d'étain fondu : 200 tonnes
- (Société linge verre plat) [12]

3.3.2.1 Principaux composants du bain d'étain

A. Canal d'écoulement

Le canal est la structure à l'escalier en trompette/en gradins à vase, il est composé de brique du sol de canal, de brique du cale de canal et de brique du mur latérale de canal.

Ils sont tous des corindons au zirconium électro fondu α - β ayant la texture compacte, la bonne stabilité thermique et la résistance à l'érosion sauf que les briques de la cale de canal sont les grandes briques d'argiles.

La goulotte est constitué d'un brique de goulotte et deux briques du mur latérale, ils sont tous des corindons au zirconium électro fondu α - β .

Les briques de goulotte peuvent diviser en forme de trompette, de goulotte verticale ou de brique lèvre, on utilise beaucoup pour le moment la forme de goulotte verticale ou de brique lèvre.

Au cours d'utilisation de goulotte, des lignes et des rayures pourront se produire à cause de l'érosion et le frottement de verre fondu. Pour des fissions et érosions très prononcées dans la goulotte, il faut le remplacer immédiatement. [12]

B. Les tops Rolls

Il s'agit des roues dentées en acier (Figures III.11), refroidis par eau et animés d'un mouvement rotatif. Ils sont incrustés dans le verre, près du bord du ruban.

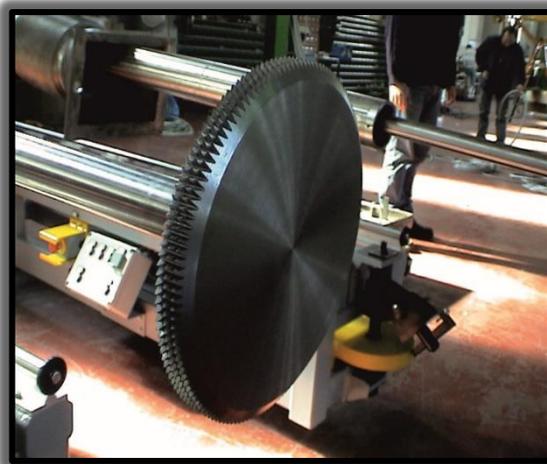
Leur axe de rotation est horizontal mais fait un angle avec la direction latérale du ruban,

même pour l'obtention de verres épais.

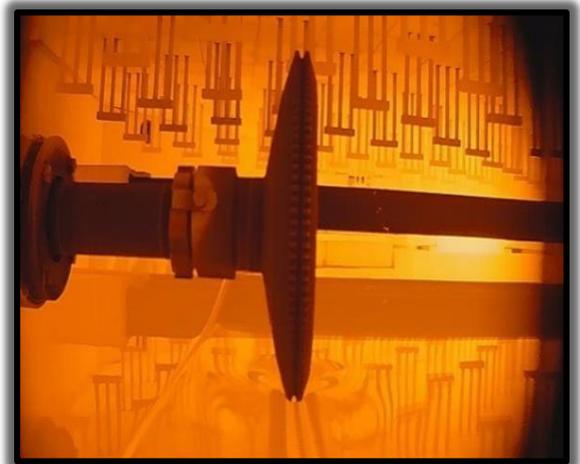
Pour un débit de verre fixe et une largeur de feuille définie,

Son épaisseur est déterminée par le rouleau supérieur avec les mouvements suivants :

- Un mouvement latéral pour déterminer la pénétration.
- Un mouvement de rotation pour déterminer la vitesse d'écoulement du verre.
- Un mouvement latéral pour déterminer les ongles horizontaux.
- Un mouvement vertical pour déterminer l'impression.



(a)



(b)

Figure III.11 : (a)top roll ;(b) top roll en contact avec le ruban de verre [16]

C. Résistance électrique



(a)



(b)

Figure III.12 : (a) Photo de les résistances électrique du bain d'étain ; (b) Photo de les résistances électrique en fonctionnement [18]

D. Refroidisseurs

Le refroidisseur du bain d'étain sert principalement à extraire la chaleur du verre de ce dernier.

Cette extraction peut être réalisée selon deux principes physiques différents : le refroidissement radiatif, réalisé à l'aide d'éléments de refroidissement situés au-dessus du ruban de verre, et le refroidissement convectif indirect, réalisé par des refroidisseurs à l'intérieur du bain d'étain.

Habituellement, ces éléments de refroidissement sont utilisés par paires des deux côtés du bain d'étain.

Divers refroidisseurs sont disponibles pour contrôler la température du ruban de verre dans le bain d'étain. La température de sortie est d'environ 600 °C.

Divers refroidisseurs sont disponibles pour contrôler la température du ruban de verre dans le bain d'étain. La température de sortie est d'environ 600 °C. [18]

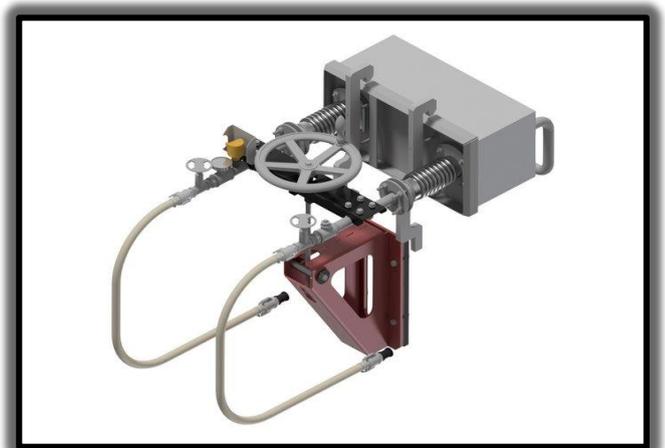


Figure III .13 : Photo des refroidisseurs [18]

E. Dross-Box

La Dross-Box est située à la sortie du bain d'étain et se compose de trois (03) rouleaux inclinés pour faire sortir le ruban de verre du bain d'étain vers la zone de recuit (étenderie)

Le bain à travers le joint latéral. Le moteur a une triphasée alimentation électrique afin que la polarité puisse être inversée et ainsi produire une circulation inversée de l'étain. L'alimentation et la hauteur du moteur ci-dessus, l'étain peut être ajusté pour donner la quantité requise de mouvement d'étain. [18]

F. Les gaz de protection N₂ et H₂

L'effet principal de gaz de protection est la protection contre l'oxydation de liquide d'étain sous la température élevée, sa composition est le gaz mélangé de N₂ et H₂ et la teneur H₂ est 4 ~ 8% et la teneur maximum en H₂ peut atteindre à 10% dans le cas particulier en accident.

Comme l'hydrogène est plus cher que l'azote, l'utilisation d'azote à des fins de refroidissement est plus économique. [12]

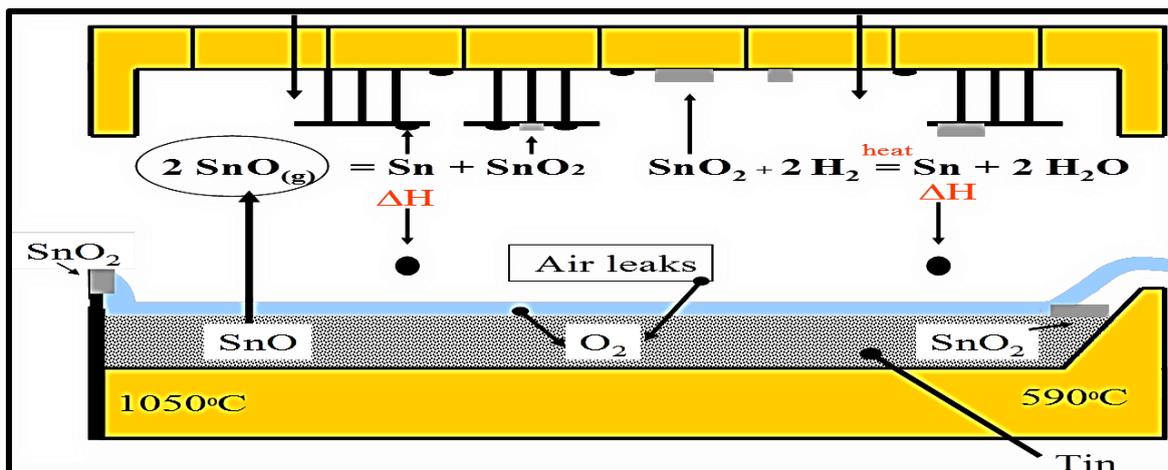


Figure III.14 : Processus de contamination d'étain. [12]

1.5.6.1 Etenderie

Afin d'éviter la formation de défauts mécaniques dus aux tensions subies par le verre pendant le refroidissement, le ruban de verre est soumis au processus d'*annealing*.

Il s'agit d'un traitement thermique effectué à l'intérieur d'un tunnel long d'environ 120 m.

Le verre est introduit à 600 °C ainsi, il refroidit sous contrôle jusqu'à la température ambiante (Des résistances de chauffage et des ventilateurs permettent un contrôle précis du profil de température dans le sens longitudinal et transversal du ruban. [19]

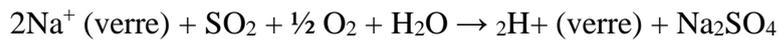


Figure III.15 : Photo de section étenderie (MFG) (PPN)

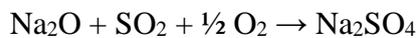
Pendant le temps de résidence du verre dans l'étenderie on introduit, afin d'améliorer ses caractéristiques, du SO₂ gazeux.

Ce procédé provoque un échange ionique en sub-surface et conduit à la formation de sulfates de sodium, selon les réactions suivantes :

- En présence de vapeur d'eau:



- En atmosphère sèche :



Ce traitement sert à augmenter la durabilité du verre en milieu acide ou neutre

- Longueur : 114,550 m. - Largeur : 5,10 m.
- Largeur originale du verre : 4,30 m.
- Épaisseur du verre : 2 à 19 mm.
- Température : - Entrée : 600 ±20 °C. - Sortie : 70~95 °C.
- Vitesse de déplacement du verre : 80~1000 m/h

Après avoir refroidi le verre, on le découpe avec un système de découpage et des normes à suivre. [16]

3.3.4 Système de découpe (Bou froid)

Le ruban de verre ainsi produit est refroidi à l'air libre, puis est contrôlé de manière permanente (épaisseur, qualité optique, défauts, etc.), coupé en plateaux de superficie standard et « débordé » automatiquement (enlèvement des bords).

Les plaques ainsi produites sont placées verticalement sur des chevalets, grâce à des releveuses [19]

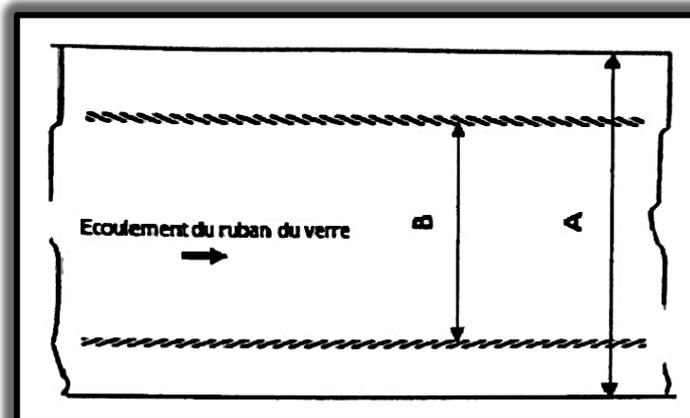


Figure III.16: Photo de découpage du verre selon les formats demandé et son stockage (PPN)

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.



(a)



(b)

Figure III. 17 : (a) Photo d'enlèvements des bords du ruban ;(b) schéma d'enlèvements des bords du ruban [16]

Avec :

A : largeur brute

B : largeur du produit fini

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

- Différents formats de la feuille du verre (Épaisseur: 2~19 mm)

Tableau III.2 : Différents formats de la feuille fabriquée (MFG). [20]

Format	PLF	DLF	DDLf	1/2 DLF
Dimensions (mm x mm)	3210 x 6000	3210 x 2550	1605 x 2400	1605x1275

3.4 Contrôle qualité

On y effectue les différents tests afin de détecter, classer et dimensionner les différents défauts. La conformité du verre aux normes de consommation est vérifiée au niveau de MFG. Pour cela, on effectue les tests suivants :

- **Le test zébra :**

Pour déterminer l'angle de déformation optique (la norme internationale est de 45°). [21]

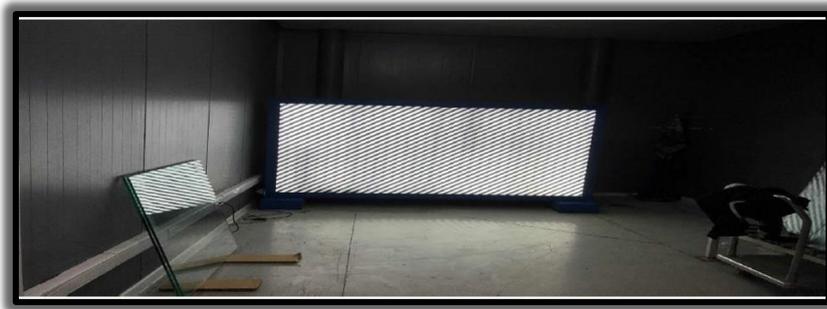


Figure III.18 : Photo de test zébra(PPN)



Figure III.19 : (a)Photo de Verre sans déformation, (b) Photo de Verre déformé(PPN)

- **Test de la lumière latérale :**

L'échantillon est latéralement traversé par une lumière blanche qui permet de bien visualiser les défauts selon la norme internationale qui propose 45° . [21]

- **Test de pupitre lumineux :**

La surface de l'échantillon est exposée à la lumière blanche afin de localiser les défauts. [21]



Figure III. 20: Photo de Le pupitre lumineux(PPN)

Pour une vérification approfondie, un examen de l'échantillon du verre est effectué 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.

3.4.1 Règlements du contrôle de la qualité

➤ Responsabilité

Selon la norme de la qualité exigée de MFG, on effectue le contrôle sur la qualité du verre flottante d'après les conclusions du contrôle en ligne et en dehors de la ligne, on détermine le classement de verre.

Quand la qualité de verre est instable, il faut le communiquer aux organes concernés à temps et remplir le « Journal du contrôle de la production de verre flottant ».

➤ Processus de contrôle

• Contrôle en ligne :

Il s'effectue toutes les 30 minutes grâce à l'appareil de détection automatique (Lassor) qui mesure les contraintes et l'optimisation de découpe et il inspecte chaque heure la vitesse de tirage et la largeur de ruban brut.

Toutes les deux heures, un prélèvement de dix échantillons sur la ligne est effectué. Quand la qualité est instable, augmentez le nombre du contrôle et le communiquez à temps à l'organe concerné.

• Contrôle en dehors de ligne

Toutes les deux heures, faites le contrôle sur la dimension, le degré de désaxement, la qualité de découpe, l'épaisseur de verre, le prélèvement d'un échantillon de 400 mm.

Les paramètres telles que la détection de la qualité optique, le degré de flexion, le défaut du point de détection, le défaut linéaire, le tirage, le sable et la quantité de tirage sont examinés pour vérifier la stabilité du verre.

- **Classement de verre selon les tests et les contrôles en ligne et en dehors de ligne**

Nous dépendons de la classification du verre sur les analyses suivantes :

Inspection : lorsque la qualité est instable augmentation de nombre de contrôle et la communication organe concerné

La réparation à temps les appareils de détection quand ils ont des problèmes.

Rapport et note : Remplissage à temps les données du contrôle en ligne et en dehors de ligne, calcule toutes les deux heures la quantité de la production. Remplissage le « Journal de bord de la production de verre flottant ».

Il faut remettre et contrôle les appareils de mesure, vérification des notes, présentation de la qualité de production. [22]

Partie

Expérimentale

Chapitre IV

Matériel et Méthodes

Chapitre IV : Matériel et Méthodes

4.2 Matériel et Méthodes

- 1. l'échantillon du verre.**
- 2. Microscope optique.**
- 3. Fluorescence X.**
- 4. Détecteur de phase.**
- 5. Analyseur d'oxygène.**
- 6. Isar vision.**

4.2.1 Microscope optique (MO)

(Lire l'annexe 01)



Figure IV.1 : photo de Microscope optique (LEICA DMP)
(PPN)

4.2.2 Fluorescence X

(Lire l'annexe 02)

➤ Principes physiques

Cette l'analyse est basée sur le principe suivant :

Nous excitons l'échantillon avec un rayonnement standard (solicitation avec un tube à rayon X) et nous analysons le rayonnement propre réémis par l'échantillon. [23]

➤ Mode opératoire de la préparation de la pastille de l'échantillon

La méthode consiste à effectuer les opérations suivantes :

- 10 g de fondants spéciaux sont mélangés avec 1 g d'une matière première (sable, calcaire, dolomie, ...) dans un petit four appelé Mini Fuse chauffé à 1000 °C pendant 5 mn pour abaisser la température de fusion.
- Après refroidissement, la perle est enlevée
- l'échantillon est soumis à un polissage pour lui donner une forme ronde (4 cm de diamètre) à l'aide une polisseuse.

- l'analyse est effectuée par fluorescence X
- la composition chimique de l'échantillon analysé est déterminée grâce au logiciel approprié.



Figure. IV.2: Photo d'un MiniFuse



Figure. IV.3: Image de la mis en forme de perle



Figure IV. 4 : Photo de Fluorescence X (PPN)

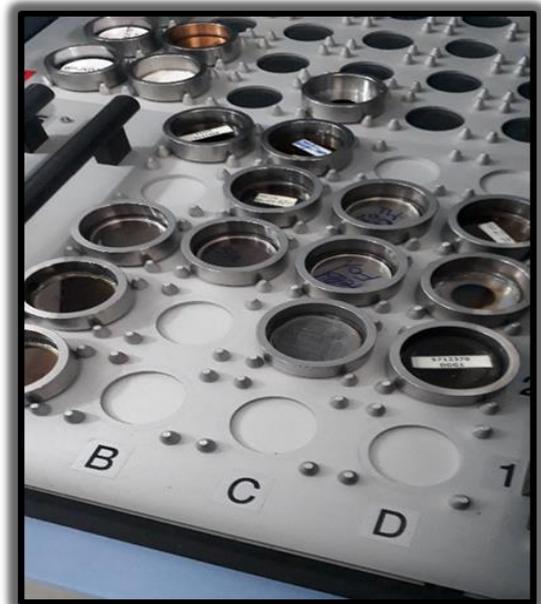


Figure IV.5: Vue de L'emplacement des deéchantillons (PPN)

4.2.3 Détecteur de phase

En matière de fabrication moderne du verre, la production s'effectue principalement dans un procédé float. Pendant le processus de fabrication, on distingue le côté placé sur le bain d'étain et le côté atmosphérique de ce verre.

Pour différentes applications en matière de transformation du verre, il est important de connaître le côté du verre qui était en contact avec le bain d'étain pendant le Processus de fabrication.

Le nouvel appareil de mesure Tin Check reconnaît rapidement et de manière simple et absolument sur le côté du bain d'étain d'un verre float. Le Tin Check peut afficher le bon résultat sur l'écran graphique, dès la première mesure.

Il suffit de poser l'appareil sur le verre et d'appuyer sur le bouton de démarrage. C'est tout. Le résultat s'affiche immédiatement. [24]



(a)

(b)

(c)

Figure IV.6 : (a) Photo de Détecteur de phase ; (b) la phase supérieure ;(c) la phase inférieur (PPN)

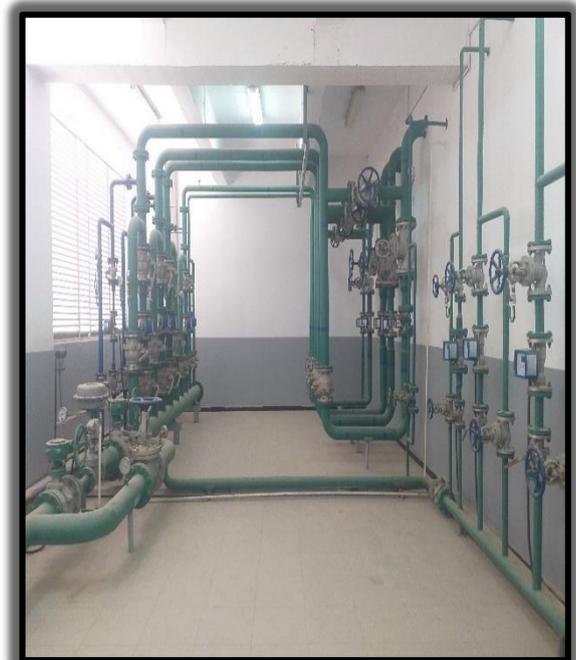
4.2.4 Analyseur d'oxygène

L'EC92DIS est un analyseur d'oxygène portable, fabriqué par Systech Illinois. Il convient à une utilisation dans les usines chimiques, l'industrie pétrochimique, les usines d'hydrogène, les usines pharmaceutiques et autres environnements dangereux (avec certification ATEX). Il est conçu pour mesurer et détecter des niveaux d'oxygène aussi bas que 1 ppm, jusqu'à des niveaux d'oxygène élevés en pourcentage.

La pile à combustible de l'analyseur ne nécessite pas d'entretien régulier et l'analyseur lui-même peut être facilement étalonné à l'aide d'échantillons d'air ambiant ou d'échantillons étalons. [25]



(a)



(b)

Figure IV.7 : (a) Photo de l'analyseur d'oxygène portable (*PPN*) ;
(b) Station des gaz de protection de MFG

4.2.5 Système d'inspection «ISRA VISION»

Le système d'inspection SpecGAGE3D d'ISRA VISION est également utilisé lors du contrôle final et convient parfaitement à la mesure et à l'inspection de toutes les surfaces transparentes et réfléchissantes. L'inspection des écrans plats ou incurvés, ainsi que du verre de protection 2D / 3D, des panneaux arrière en verre des smartphones et d'autres pièces brillantes du boîtier est possible avec le système d'inspection.

Ce système décide immédiatement comment trier les marchandises en fonction de plages de tolérance définies et d'une classification automatisée des défauts. [26]



Figure IV.08 : Photo de système d'inspection « SpecGAGE5D d'ISRA VISION »

Chapitre V

Résultats et Discussions

Chapitre V. Résultats et Discussions

5.1 Introduction

Défauts de verre flottant ont été divisés en six grandes catégories suivant la position de Formage

A. Défauts des matières premières : Défauts entraînés par la qualité de propres matières premières et les impuretés extérieurs à Cause de raison différente.

B. Défauts de fusion : Défauts résultant de mauvaise fusion à la partie/section de fusion

C. Défauts de matériaux réfractaires : Défauts résultant d'érosion fondue de matériaux réfractaires et d'attaque de matériaux

Réfractaires par l'autre mode

D. Défauts de formage : Défauts formé à la position de formage

E. Défauts de recuit : Défauts résultant de non convenable de régime de recuit ou d'accident au cours de recuit.

F. Défauts de transformation et de stockage de verre froid : Défauts résultant au cours de découpage, d'emballage et de stockage de verre.

5.2Parti 01 : Identification des défauts

5.2.1 Identification par microscope optique

L'examen de ces résultats fait apparaître les défauts regroupés dans le Tableau (V. 01) suivant

Tableau V. 01 : Types et nombre du défaut identifiés par MO

Type de défaut	Nombre du défaut trouvés lors de l'analyse
Bulle d'air sans sulfate	31
Quartz	9
Corindon	35
Déformation optique	31
Trait linéaire optique	19
Pierre d'oxyde d'étain	70
Tache d'oxyde d'étain	68
Laine de verre	13
Griffe de face inférieure	2
Totale	278

Ces résultats sont exploités en utilisant l'histogramme (Figure 1. V) suivant :

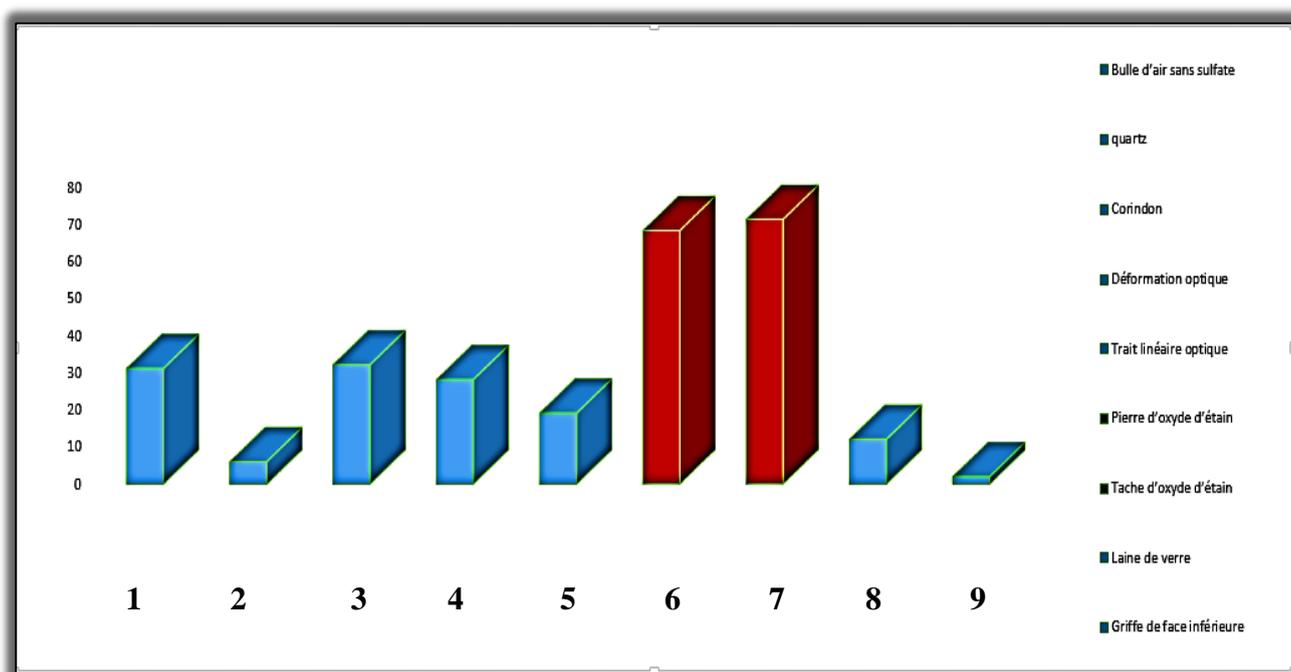


Figure V.01 : Histogramme de nombre des défauts pondent 10 jours.

1 Bulle d'air sans sulfate

2 Quartz

3 Corindon

4 Déformation optique

5 Trait linéaire optique

6 Pierre d'oxyde d'étain

7 Tache d'oxyde d'étain

8 Laine de verre

9 Griffes de face de verre

Cet histogramme montre que pendant les 10 jours d'études :

- Une présence de 9 types de défauts repères.
- Les défauts sont souvent des pierres et/ou des taches d'oxyde d'étain
- Les défauts ses sources de formage sont plus nombreux par rapport aux autres types.

Dans cette partie, nous nous sommes proposé d'étudier les défauts d'origine du bain d'étain

Les défauts décrits dans cette section ne couvrent que ceux générés dans le bain dû à des interactions dans le système « verre - étain – atmosphère ». Les défauts générés par le four ne sont pas couverts.

Selon la particularité spéciale de formage de verre flottant, les défauts causés au cours de formage se divisent en trois catégories principales :

- Inclusion solide : désigner principalement SnO_2 ; SnO ; SnS et Sn . Ils répartissent à la partie supérieure, au milieu et à la partie inférieure de la plaque de verre

B. Inclusion gazeuse : bulle d'air

C. Déformation optique : Déformation au bord

A. Inclusion solide

- **Pierre d'oxyde d'étain SnO_2**

Il se trouve sur la surface supérieure de verre, est en point blanc sur la surface de la plaque de verre, parfois, en pelote et en fil/ligne sur la surface de la plaque de verre.

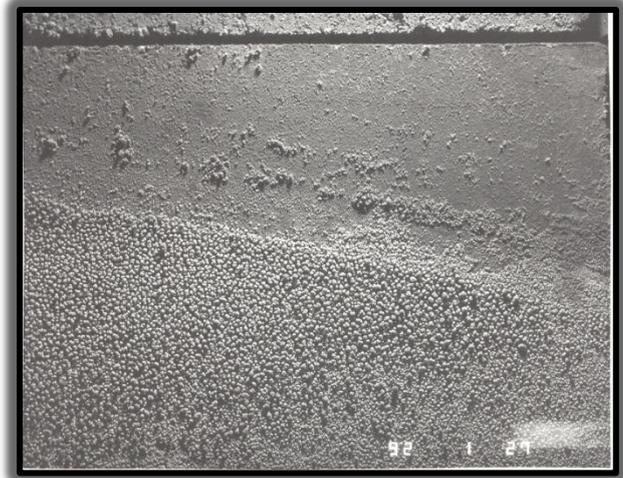
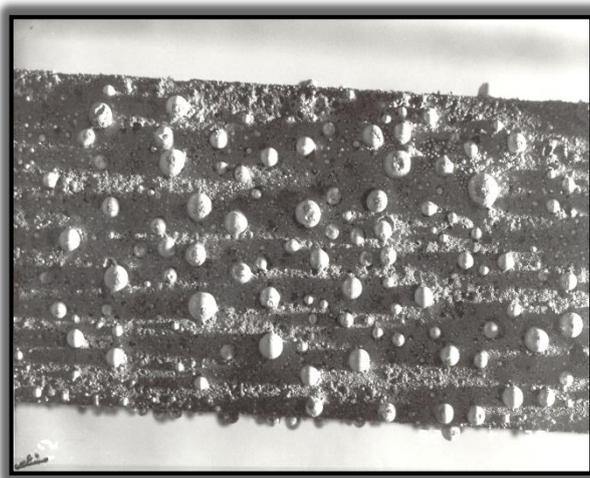


Figure V.02 : Photo montrant la pierre d'oxyde d'étain SnO_2 .

➤ Le micro photo comme suit :



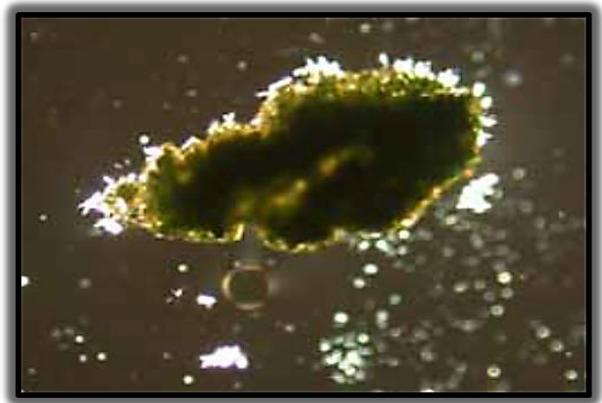
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure V.03 : (a), (b) Photo montrant Pierre d'oxyde d'étain SnO_2 sous le microscope 20 μm (PPN)

(c), (d) Photo de Pierre d'oxyde d'étain SnO_2 référentiel

L'examen de ces résultats fait apparaître les défauts de pierre d'oxyde d'étain regroupé dans le Tableau (V. 03) suivant :

Table V.03 : Nombre du défaut de pierre d'oxyde d'étain trouvés lors de l'analyse.

Type de défaut	Nombre du défaut trouvés lors de l'analyse	Fraction(%)
Pierre d'oxyde d'étain	44	64.70
Pierre d'oxyde d'étain en corail	3	4.41
Pierre d'oxyde d'étain en aiguille	16	23.52
Pierre d'oxyde d'étain avec déformation optique	1	1.47
Série de pierre d'oxyde d'étain en aiguille avec déformation optique	4	5.88
Totale	70	100

- **Pierre d'Oxyde d'étain en aiguille**

Le défaut est incrusté dans le verre, c'est-à-dire à l'intérieur de l'épaisseur. Il est produit après recyclage du verre contaminé par des défauts d'étain. Le verre non conforme est rejeté et renvoyé dans le silo à calcin. Il est réintroduit dans le four au fur et à mesure de l'enfournement des matières premières. Si la taille du défaut est importante, l'oxyde d'étain ne sera pas totalement fusionné et sortira dans le ruban comme un défaut incrusté.

➤ Le micro photo comme suit :



(a)



(b)



(c)

Figure V.04 : (a), (b) Photo montrant la Pierre d'oxyde d'étain en aiguille sous le microscope 20um (PPN).

(c) Photo de Pierre d'oxyde d'étain en aiguille référentiel

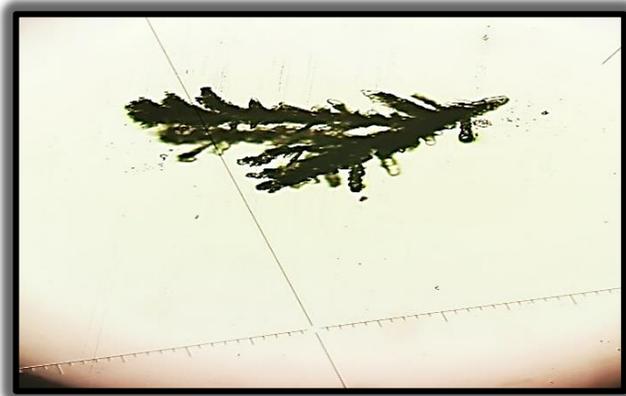
- **Pierre d'Oxyde d'étain en Corail**

C'est un défaut qui se trouve sur la surface inférieure de ruban de verre. Si les rouleaux de la dross-box et de l'étenderie sont contaminés par l'oxyde d'étain, ce dernier va s'imprimer au verre et va coller à la face inférieure du ruban.

Ce phénomène va s'aggraver si l'épaisseur est plus importante du fait du poids du verre et la pression exercée sur les rouleaux.

Du fait de différence de zone de température le long du processus, l'adhésion du défaut au verre change proportionnellement. Elle est plus importante au niveau de la dross-box et moins présente vers le milieu de l'étenderie. Ce problème d'existe pas à la fin de l'étenderie. Il faut prévoir le remplacement et/ou le nettoyage des rouleaux.

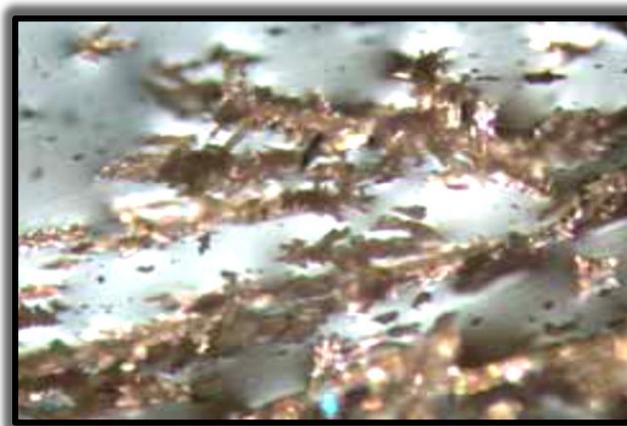
➤ Le micro photo comme suit :



(a)



(b)



(c)

Figure V.05 : (a), (b) Photo montrant la Pierre d'Oxyde d'étain en Corail sous le microscope 20um (PPN).

(c) Photo de Pierre d'oxyde d'étain en corail référentiel.

- **Pierre d'étain**

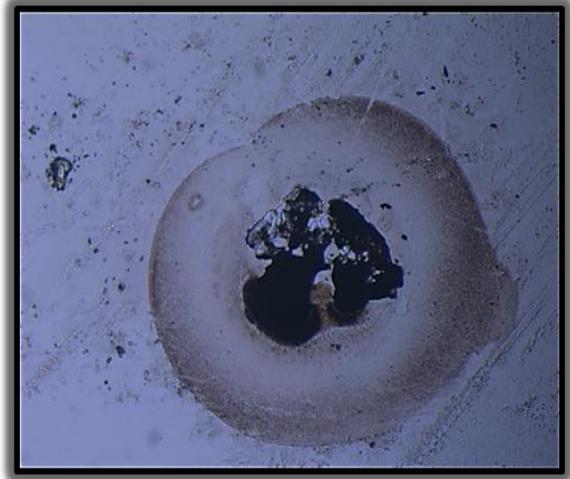
Il se trouve dans la plaque de verre

Il se présente comme le cristal en grain, en corail et en aiguille, le micro photo comme suit

➤ Le micro photo comme suit



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure V.06: (a), (b) Photo de pierre d'étain sous le microscope 20um (PPN)

(c) Photo de pierre d'étain référentiel

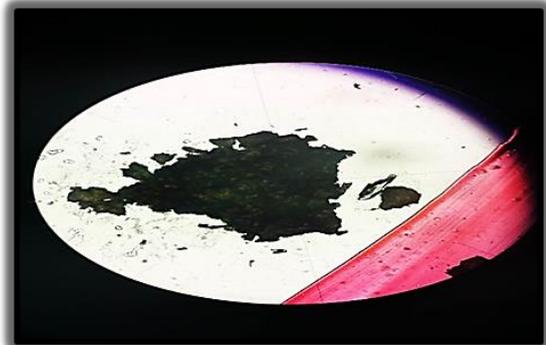
- **Tâche d'étai**

On peut observer la tâche billard avec les anneaux de réaction sous la lumière Latérale.

➤ Le micro photo comme suit :



(a)



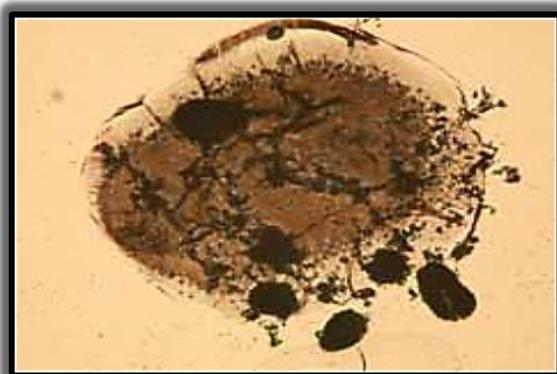
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figure V.07 : (a), (b) Photo de Tache d'étain sous le microscope 20um, (f) tache d'étain avec anneau de réaction (PPN)

(c), (d), (e) Photo de Tache d'étain référentiel

- **Tâche au bout froid**

Il se présente comme la poussière en point continu sur la surface inférieure de Verre. C'est un défaut le plus petit qui peut observer avant la présentation de scorie D'étain la première fois, est aussi un présage/signe de perte de l'étanchéité du bain D'étain. On peut observer ce défaut aux yeux, c'est la différence de gelée d'étain et de Point d'étain.

➤ Le micro photo comme suit :



Figure V.08 : Photo montrant la tache de rôle sous le microscope 20um (PPN)

L'examen de ces résultats fait apparaître les défauts de pierre d'oxyde d'étain regroupé dans le Tableau (V. 04) suivant :

Tableau V .04 : Nombre du défaut de trouvés lors de l'analyse.

Type de défaut	Nombre du défaut trouvés lors de l'analyse	Fraction(%)
Tache d'oxyde d'étain	68	95.77
Série de tache avec déformation	3	4.22
Totale	71	100

B. Inclusion gazeuse

- **Bulle d'air sur la surface supérieure**

Il se trouve sur la surface supérieure de verre, le diamètre est généralement inférieur à 0.1mm, on peut l'observer sous la lumière latérale et l'essai de l'argentage, il peut se diviser en quelques catégories suivants selon la différence de position et de raison de génération

➤ Le micro photo comme suit :

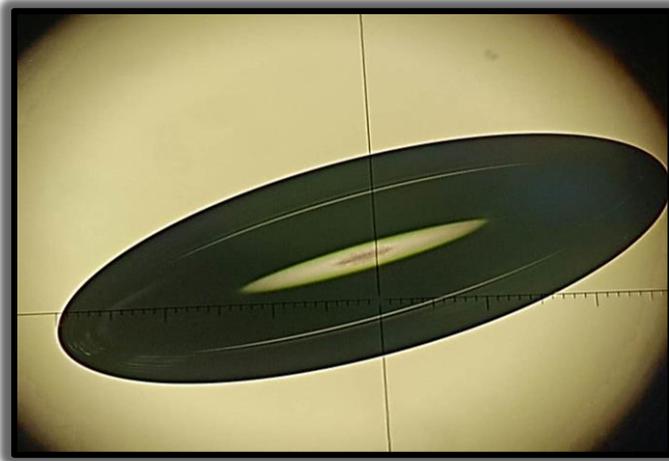


Figure V.09 : Photo montrant un bulle d'air sous le microscope 20um (PPN).

- **Déformation optique**

Le défaut de déformation optique avec tache d'oxyde d'étain dans la fabrication du verre float se réfère à une anomalie visuelle qui se produit lorsque des particules d'oxyde d'étain se retrouvent piégées dans le verre float pendant le processus de production. Ces particules d'oxyde d'étain peuvent former des taches ou des dépôts dans le verre, ce qui entraîne une déformation optique visible, souvent sous la forme de distorsions, de vagues ou de zones floues.

➤ Le micro photo comme suit :

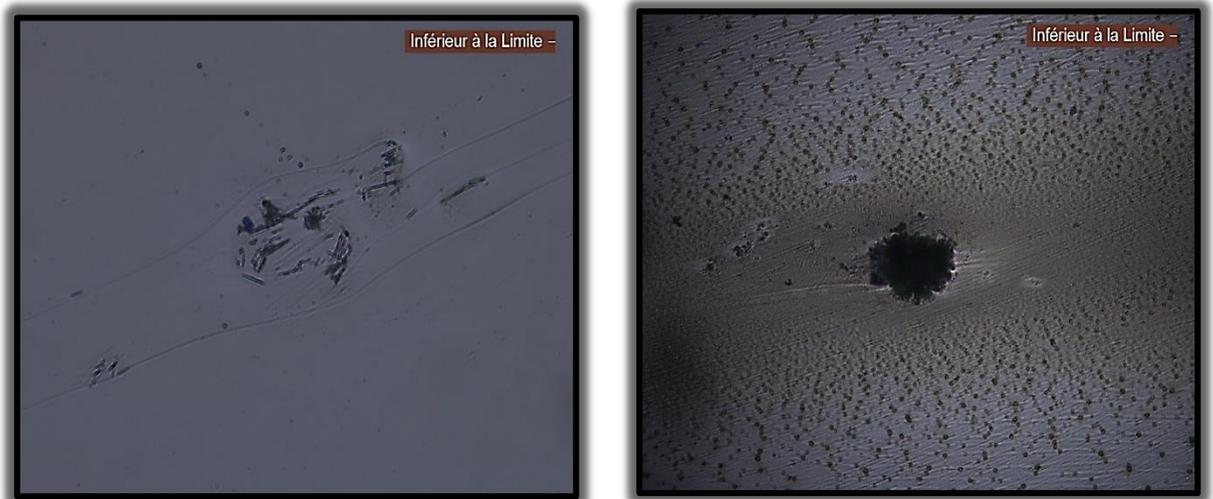


Figure V.10 : Photo montrant une déformation optique avec corps sous le microscope 20um (PPN).

5.2.2 Identification par Fluorescence X

Après avoir étudié les défauts au niveau du microscope et connaître leurs formes et type

Nous avons exposé l'un des défauts contenant de l'oxyde d'étain, apparu en abondance durant cette période, à l'appareil à rayons X, pour connaître son pourcentage dans la composition du verre final (produit fini).

Les résultats des tests sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau V.05 : les proportions des composants dans un échantillon du verre

Composition %	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	SnO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Cl	ZrO ₂	CuO	SrO
verre de MFG	71,9	13,81	8,88	4,31	0,99	0,56	0,14	0,0072	0,07	0,03	0,02	0,0035	0,0026	0,0019
défaut SnO ₂	71,64	14,33	8,67	4,34	0,46	0,24	0,11	0,08	0,07	0,03	0,02	0,0056	0,0041	0,0025

Ces valeurs résultats montrent que la proportion d'oxyde d'étain est importante dans la composition du verre.

Généralement, un produit contenant ce pourcentage est considéré comme un produit indésirable, ce qui entraîne des rendements décroissants.

Comme l'objectif est de connaître les raisons de l'apparition de ces défauts dans le produit final, nous nous sommes proposées de suivre et d'étudier toutes les raisons à l'origine de cet événement.

5.2.3 Identification macroscopique

5.2.3.1 Caractérisation des défauts des Equipements

5.2.3.1.1 Etanchéité du bain d'étain

Pour éviter le problème d'oxydation de l'étain ou cours de travail, les équipements d'étanchéité du bain d'étain doit être on bonne fonctionnement. Le débit de pression du bain est de $30 \text{ Pa} < P < 35 \text{ Pa}$. L'intégrité du joint de ciment doit être maintenue en bon état tout le temps. Des joints en laine de verre doivent être utilisés pour réduire temporairement les ouvertures au minimum.

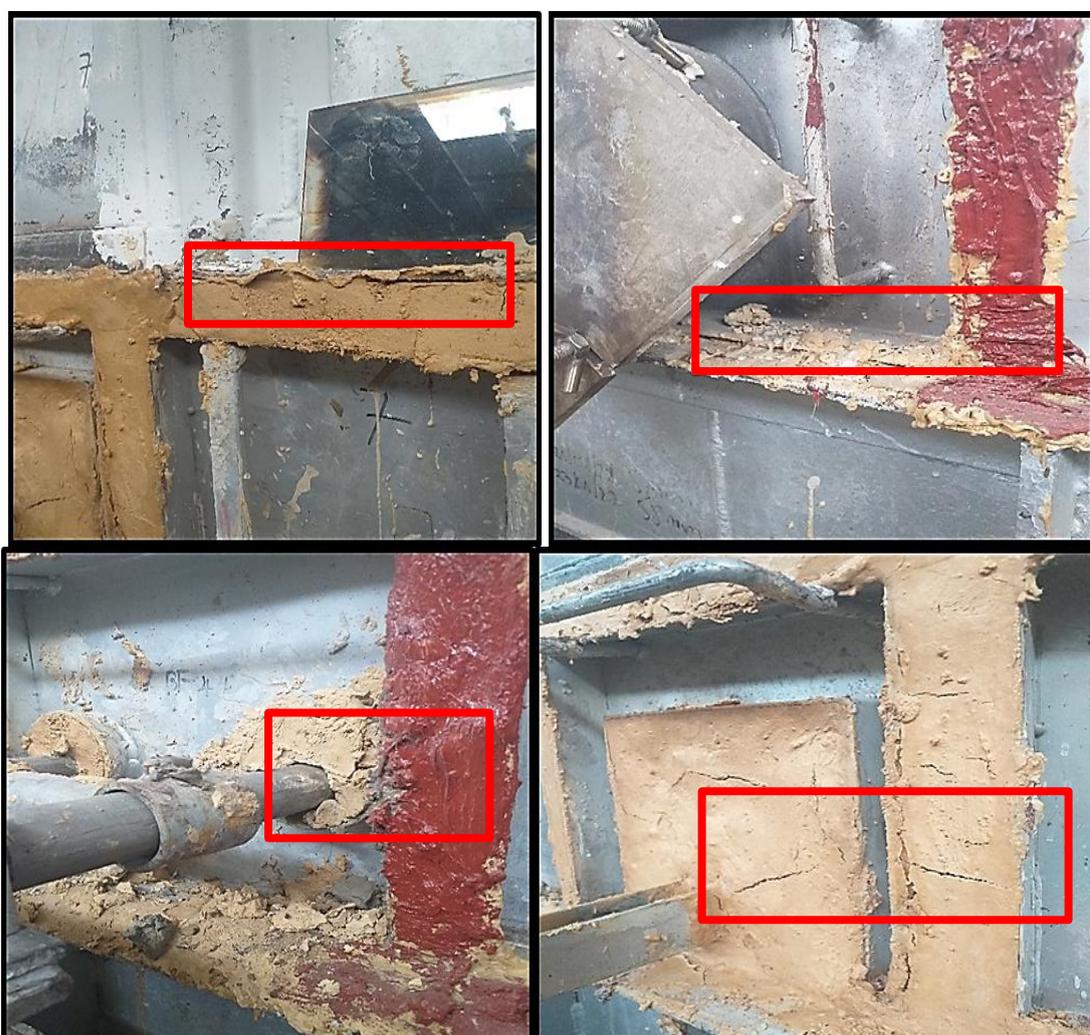


Figure V.11 :

- (a), (c) Mauvaise étanchéité, sortie de flamme
- (b) Mauvaise étanchéité, perte de pression
- (d) Mauvaise étanchéité dans les endroits cachés
(PPN)

5.2.3.1.2 Utilisation en continu du système venting

Le système d'aération (venting) nettoie l'atmosphère du bain d'étain des impuretés, qui se forment lorsque l'oxygène entre.

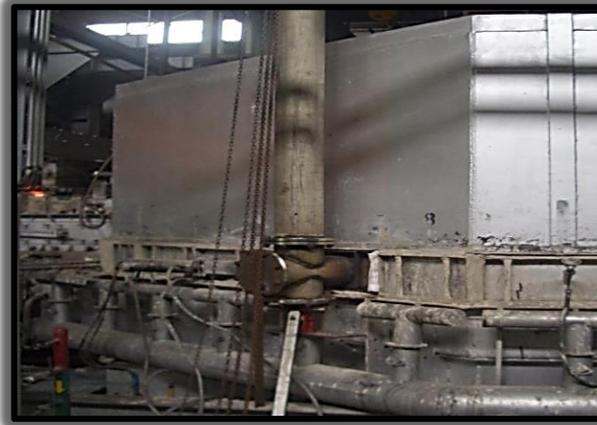


Figure V.12 : Photo du système venting (PPN).

Accumulation d'oxyde d'étain dans la venting créé en blocage du aux impuretés dans le bain d'étain.



Figure V.13 : Photo de l'accumulation de SnO_2 (PPN).

5.2.3.2 Moteur linéaire

Utilise des forces électromagnétiques pour se déplacer électriquement Matériaux conducteurs dans une direction parallèle à son axe, son utilisation dans Le bain flottant doit fournir un moyen de circulation de l'étain fondu. Le moteur est soutenu par une poutre refroidie à l'eau qui est insérée dans

Depuis la reprise de la fabrication, à partir du 22 janvier jusqu'à la mi-juin, l'actionneur linéaire n'était pas relié au bain car il était en dommage.

L'absence d'un moteur linéaire qui joue un rôle important dans l'élimination de l'étain et de l'oxyde d'étain, ce qui a conduit à sa cohérence avec le verre et à son apparition sous forme de défauts dans le produit final.



Figure V.14 : Photo de Moteur linéaire(PPN).

5.2.3.2 Paramètres de sortie du bain d'étain

Un tronçon d'installation thermique entre le bain d'étain et l'étenderie appelle le bout de sortie, Appelle aussi lift Out Rolls, et son organe dépend dans l'ensemble de l'herméticité/étanchéité À l'air du bain d'étain.

Généralement, lorsque l'étain s'oxyde, il cherche une surface froide pour se précipiter (conducteurs) dessus, lorsque le verre, qui n'a pas complètement durci, passe dessus, il s'y colle, et des défauts apparaissent dans ce dernier.

Pour éviter ce processus, du gaz SO₂ doit être ajouté périodiquement, ce qui crée à son tour une couche isolante sur le verre pour empêcher l'oxyde d'étain d'y adhérer, et cette couche est assurée à la fin.

De plus, le processus de nettoyage du convoyeur doit être effectué de temps en temps.

5.2.3.3 Étude des gaz de protection N2 et H2

5.2.3.3.1 Variation des débits

Les débits de gaz sont donnés dans les proportions du processus, soit 1600m³/h d'azote + 4% d'hydrogène (160m³/h). A noter que le pourcentage d'H₂ est compris entre 4 à 8% et Ne doit pas dépasser les 10% d'azote en cas de perturbation.

$$\text{Concentration maximale de sécurité H2 \%} = \frac{\text{température maximale}}{100} - 2$$

$$\begin{aligned}\text{Concentration maximale de sécurité H2 \%} &= \frac{1000^{\circ}\text{C}}{100} - 2 \\ &= 10 - 2 \\ &= 8\%\end{aligned}$$

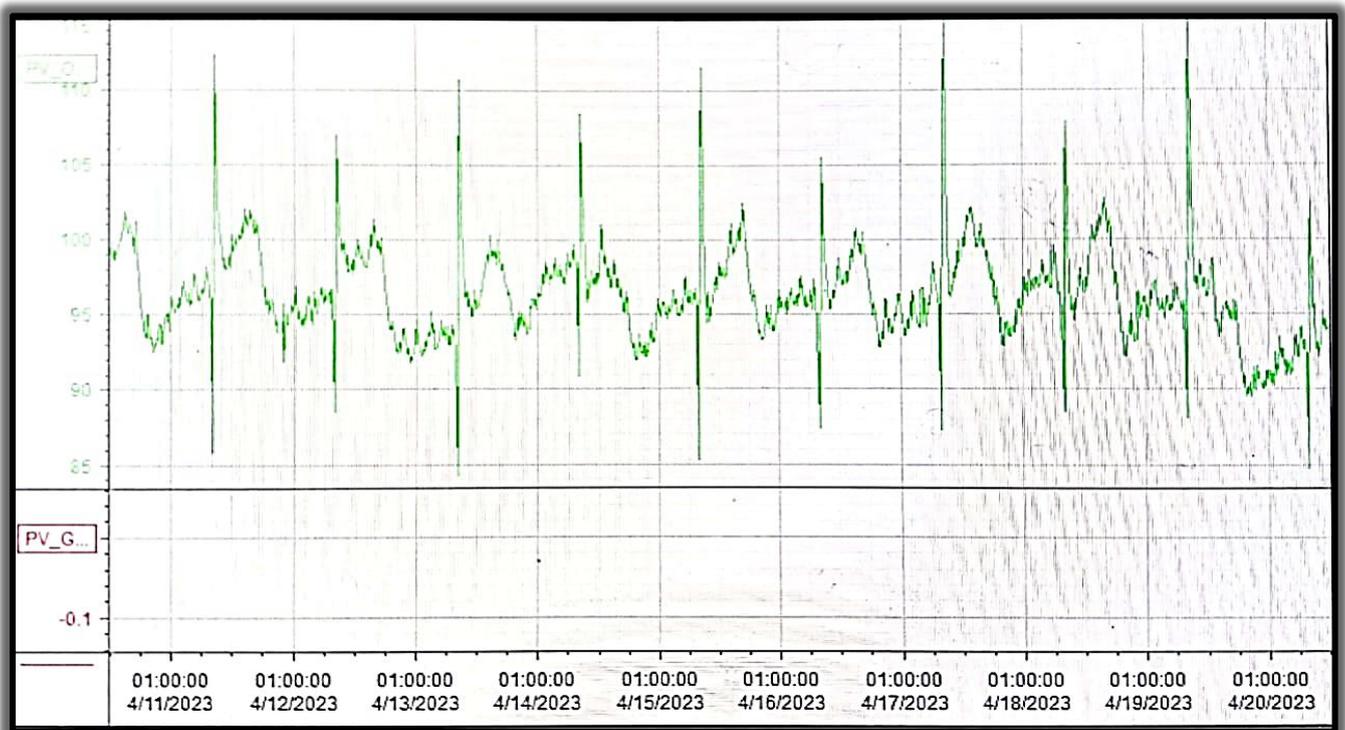


Figure V.15 : Courbe de la pression de H₂ à l'entrée de bain d'étain.

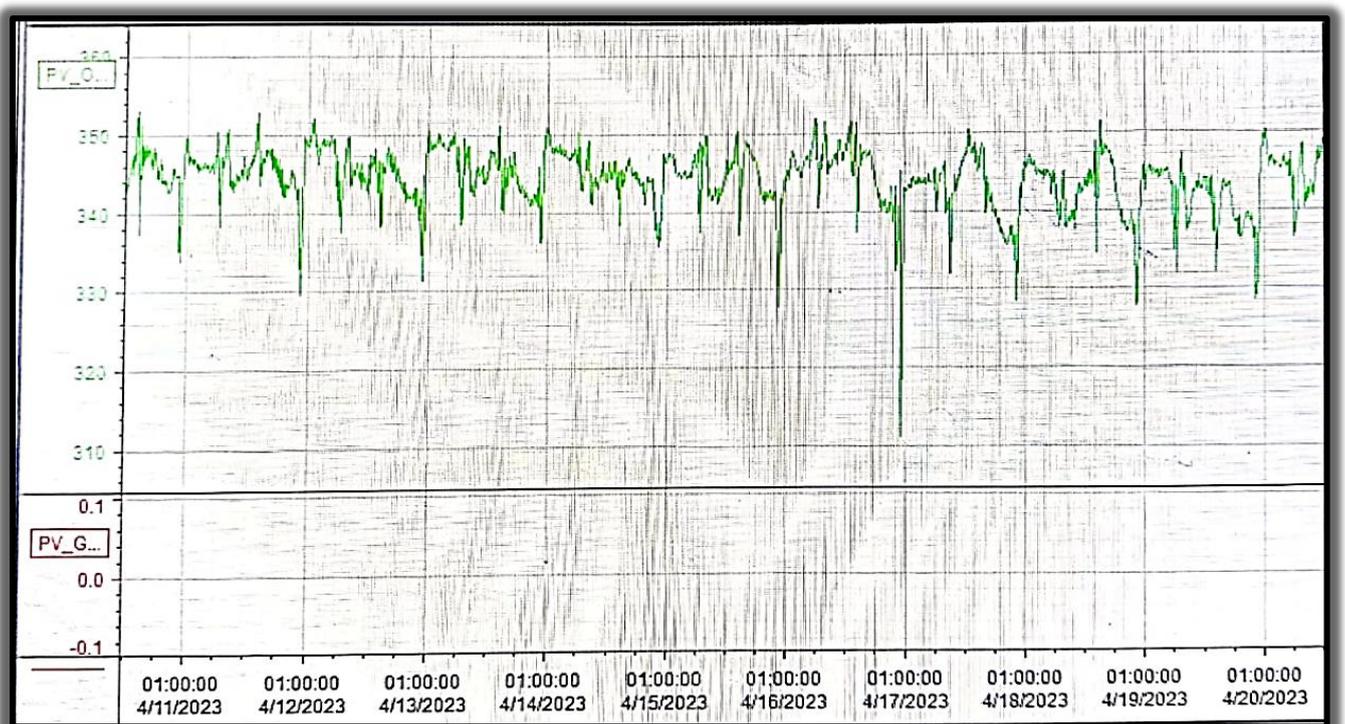


Figure V.16: Courbe de la pression de N₂ à l'entrée de bain d'étain.

Ce dernier relevé indique la variation de pression des gaz de protection H₂ et N₂ à l'intérieur de bain d'étain durant la période d'étude le 10/05/2023 jusqu'à 20/05/2023.

La pression de N₂ est très salve par rapport de H₂ Parce que nous avons injecté des proportions différent de N₂% 10 et 4% de H₂

La pression des gaz fluctue, et nous pouvons attribuer cette fluctuation à l'instabilité du débit, bien que la quantité de gaz qui s'écoule reste constante.

5.2.3.3.2 Variation de pression

Pour assurer la stabilisation de pression ou niveau du bain d'étain tout d'abord il faut garder les débits des gaz de protection constant.

La pression est calculée par la formule suivante :

$$\text{Pression du bain d'étain (mbar)} = \frac{\text{débit total des gaz de protection } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right)}{\text{surface totale du bain d'étain (m}^2\text{)}} \pm 0.02$$



Figure V.17 : Photo des zones de bain d'étain (PPN).

Pour se préserver la pollution de verre à **cause** de l'oxydation de verre fondu dans le bain d'étain , il est nécessaire d'être plein de gaz réducteur faible dans le bain d'étain, l'usage courant du nitrogène(N₂) et de l'hydrogène(H₂).

L'espace dans le bain d'étain est comme un récipient à la température élevée pour le gaz de protection, la hauteur de pression géométrique apparut/présenté par le gaz à haute température est très remarquable, quand la zone à haute température du bain d'étain est la pression positive, la zone à basse température est peut-être la pression négative.

Quand la partie supérieure du bain d'étain est la pression positive, la partie inférieure est peut-être la pression négative.

Quand la quantité de gaz de protection est insuffisante ou mal étanchéité du bain d'étain, il pourra produire la pression négative partielle de façon que l'air entre dans le bain d'étain, pollue le verre et augmente la consommation en énergie.

La proportion de N_2 et H_2 de trois zones : avant, milieu et arrière du bain d'étain. Et la pression de gaz mélangé doit effectuer la distribution et le contrôle selon la demande technologique. Il est demandé que la qualité et la quantité de gaz de protection sont meilleur et stable au cours de formage de verre flottant afin d'assurer la micro pression positive dans le bain d'étain et de prévenir l'entrée de l'air extérieur, de façon que la surface de verre produit.

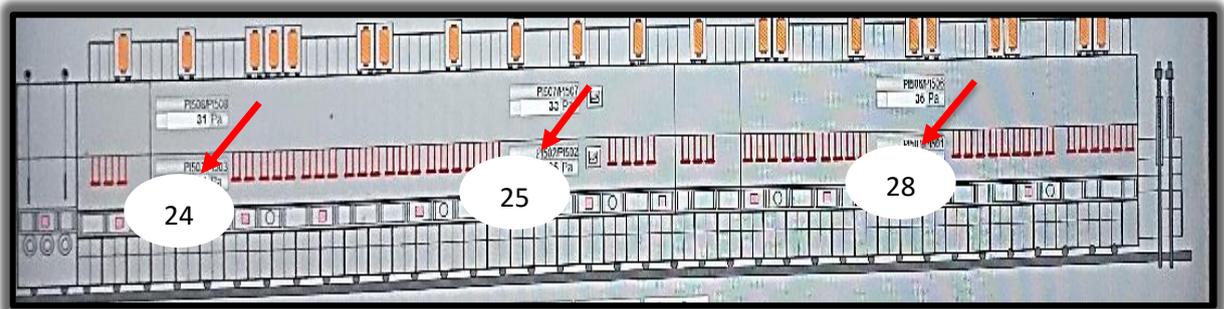


Figure V.18: Photo représente la pression de bain d'étain donc les 3 zones(PPN).

La valeur de la pression dans le bassin varie selon les régions, car la photo indique que celle-ci est élevée à l'entrée, pour décroître en valeur comme suit :

Nous expliquons la raison de cette chute de pression en nous basant sur la loi des gaz

Parfaits $PV = nRT$; le volume et la quantité de gaz sont constants dans les conditions de travail, à l'exception de la température :

Où est la température à

L'entrée = 1050-940 °C.

Au milieu = 840 °C.

À la sortie = 740-600 °C.

Ainsi, la pression à l'intérieur du bassin dans ses différentes régions est directement liée à la température $P=f(T)$.

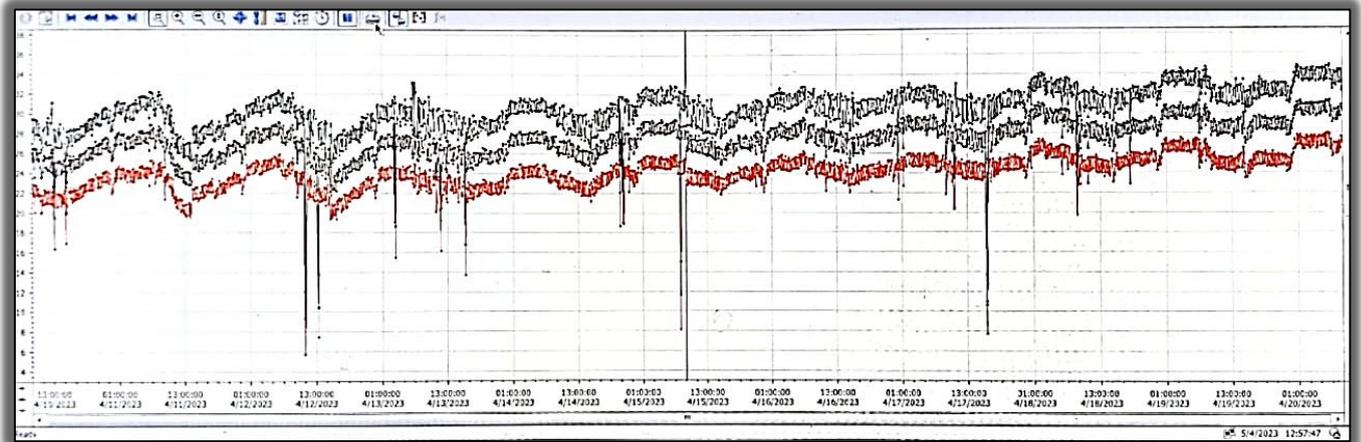


Figure V.19 : Courbe de la variation de pression bain dans ses trois régions.

La courbe montre la valeur de la pression du bain dans ses trois régions de la période du 10/04/2023 au 20/04/2023

La valeur de la pression est quasi constante sur toute la période, à l'exception de la présence d'une diminution notable sur certaines courtes périodes, de sorte que la pression retrouve rapidement sa stabilité

Mais cette perturbations des deux gaz dans les reins à cette période est tout à fait normale, En raison d'un changement de l'épaisseur du verre de 5 mm à 3 mm Au cours de ce processus, un plus grand nombre des TOP ROLLES Cela entraîne une fuite de gaz

5.2.4 Identification par Analyseur d'oxygène

5.2.4.1 La qualité des gaz de protection

Toujours avant l'injection des gaz de protection vérifier la pureté de ce dernier, pour cela on a utilisé

L'analyseur d'oxygène

Tableau V.06 : Impureté des gaz de protection.

Temps(h)	0	1	2	3	4	5
Pureté N2	5.81	4.92	1.10	0.91	0.82	0.68
Pureté H2	1.60	1.21	1.13	1.02	0.09	0.07

Pour que le processus d'injection de ces gaz dans le bassin, le pourcentage d'oxygène doit être de 0.03 à 1. Plus on se rapproche de la valeur de 1, plus la qualité du gaz est faible, et vice versa

Comme nous pouvons le voir sur les résultats du tableau pour les deux gaz, la valeur est plutôt élevée. Bien que la valeur soit dans l'intervalle acceptable, elle est sans aucun doute affectée négativement et contribue à l'oxydation de l'étain au lieu de le réduire.

Pour éviter ce processus, du gaz SO_2 doit être ajouté périodiquement, ce qui crée à son tour une couche isolante sur le verre pour empêcher l'oxyde d'étain d'y adhérer, et cette couche est assurée à la fin.

De plus, le processus de nettoyage du convoyeur doit être effectué de temps en temps.

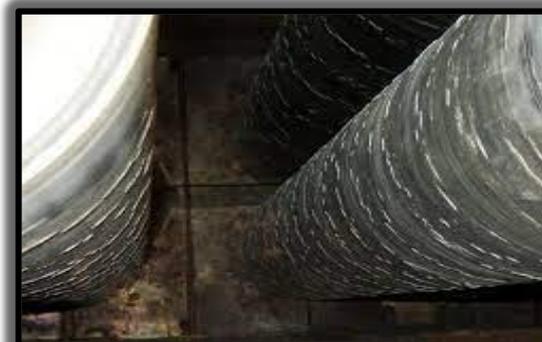


Figure V.20: Photo des rouleaux avant le nettoyage (PPN).

5.3Parti 02 : Les solutions des défauts

Afin d'éviter l'apparition des défauts nous proposons les solutions suivantes :

5.3.1 Les taches

1. Réduire la température finale de sortie.
2. Maintenez la surface de l'étain propre à l'extrémité de sortie - dégraissez régulièrement.
3. Installez un plongeur SO2 entre les rouleaux 3 et 4 à la position de défaut.
4. Installez des plongeurs supplémentaires plus en aval si un rouleau d'arche est suspecté.
5. Abaissez le rouleau suspect.
6. Si le défaut est rejeté, examinez la possibilité de couper une largeur étroite ou une largeur différente.



Figure IV.21:Photo montant les rouleaux après le nettoyage (PPN).

5.3.2 Pierre d'étain

1. Stabiliser l'allure du bain d'étain, éviter l'accident.
2. Une fois que le ruban de verre est pollué gravement par l'étain (il arrive L'accident), il faut envoyer le personnel spécial pour enlever la substance adhésive D'étain sur le ruban de verre.

5.3.3 Pierre d'oxyde d'étain

1. Augmenter la quantité de nitrogène dans le réservoir de nitrogène et agrandir L'effet d'étanchéité d'air.
2. Maintenir l'étanchéité au tour de zone de tweel et de section de zéro du Bain d'étain.
3. Augmenter le débit de gaz de protection de section de zéro du bain

D'étain, prévenir que la substance volatile dans le bain d'étain retourne à la zone
De tweel.

- 4.** Nettoyer régulièrement le tweel d'étranglement.
Maintenir l'étanchéité effective à la zone de tweel, réduire l'accumulation
De SnO et SnS à l'endroit de tweel d'étranglement.
- 5.** Ouvrir régulièrement la vanne de vidage, substituer le gaz pollué dans le bain
D'étain.
- 6.** Augmenter l'effet d'étanchéité des briques d'arrêt de flamme ou des briques
De dents frontales.
- 7.** Abaisser plus possible la pression de la partie de refroidissement
Stabiliser le débit, réduire plus possible le nombre de réglage de tweel.
- 8.** D'étranglement, en cas d'un petit peu de variation de débit, régler la largeur de
Bord lumière par la méthode de réglage de vitesse de machine à rouleau 1.
Renforcer l'étanchéité de bay 0.
- 9.** Relie le moteur linéaire au bain d'étain.
- 10.** Nettoyage de système venting.

5.4Parti 03 : Le rendement de qualité

5.4.1Introduction

Comme toute usine dans le monde, l'entreprise MFG tient à augmenter le volume des bénéfices en augmentant la quantité de production en veillant à ce que le produit final soit de haute qualité et conforme aux normes internationales.

Pour cela, nous utilisons des systèmes spéciaux ISRA, qui vérifie la ligne du verre flotté de manière précise et fiable. Côté chaud vers côté froid. Il mesure les déformations du verre, leur taille et les divise en groupes instantanément afin que les défauts puissent être résolus rapidement tout en maximisant l'efficacité de la production.

5.4.2Identification par Analyseur d'oxygène

La classification des défauts par la taille est indiquée ci-dessous :

Tableau IV.07 : Les classes des défauts salent lors Dimensions

Classes	Dimensions du défaut ponctuel
A.C1	$0.6 < d < 1.5$
B.C2	$1.5 < d < 03$
C.C3	$03 < d < 06$
D.C4	$06 < d < 09$
E.C5	09

Résultats de l'examen de l'appareil rassemblés dans le tableau suivant :

Tableau IV.08 : Classe de nombre de défauts par type d'ISRA

Type class	Class1	Class2	Class3	Class4	Class5	Class6	Class7	Class8	Class9	Class10	Sum
Bulle	103	5647	790	127	289	0	0	0	0	0	6956
Bulle (non déformante)	0	126	0	0	0	0	0	0	0	0	126
Bulle	66	917	63	17	12	0	0	0	0	0	1075
Bulle milieu	63	1737	68	86	32	0	0	0	0	0	1986
Bulle haut	80	4548	688	79	32	0	0	0	0	0	5427
	19	291	137	47	86	0	0	0	0	0	580
Défaut ponctuel	120	3032	179	44	463	0	0	0	0	0	3838
Défaut ponctuel Test	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pierre	144	4677	3933	692	820	0	0	0	0	0	10536
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oxyde d'étain	0	1	73	12	4	0	0	0	0	0	90
Point supérieur	3	12	30	40	589	0	0	0	0	0	674
Etain supérieur	80	7807	49	2	5	0	0	0	0	0	7943
Etain supérieur Test	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum	678	28795	6010	2332	0	0	0	0	0	0	39231

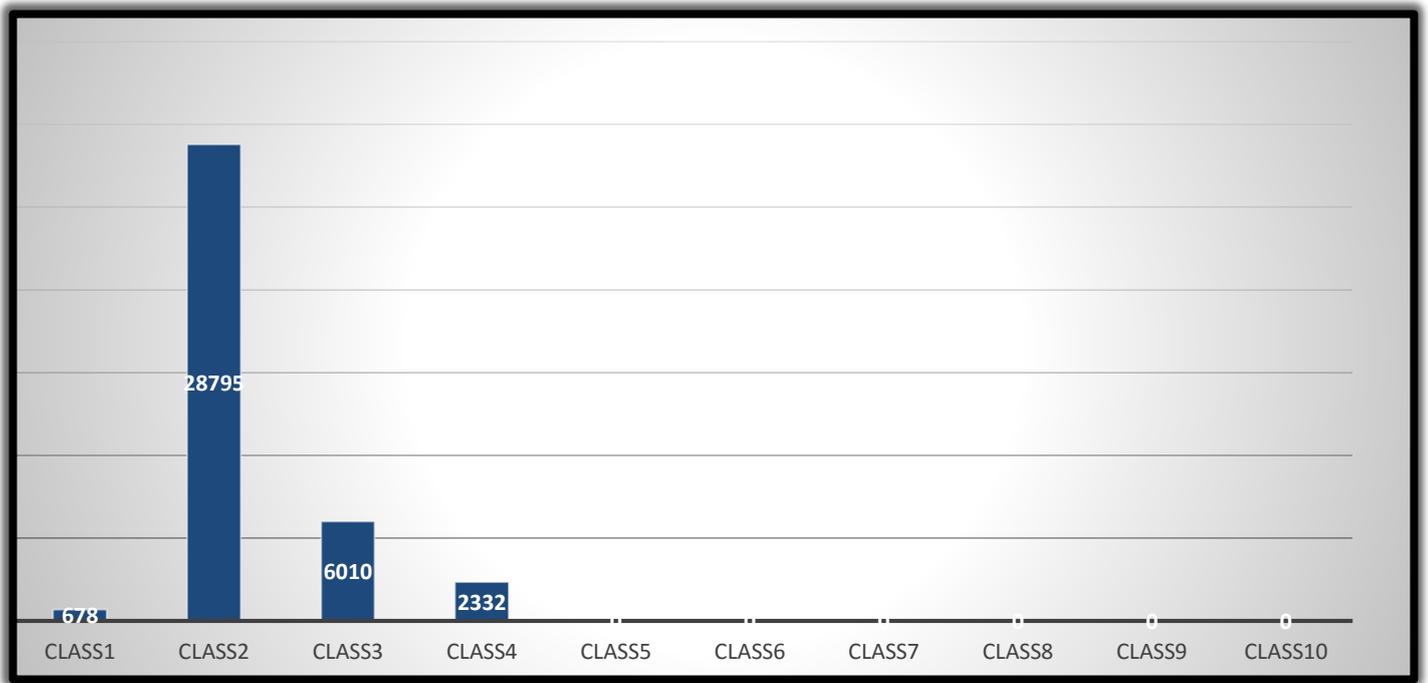


Figure V.22: histogramme des défauts par rapport les classes.

Nous remarque d’après les résultats que la majorité des défauts appartiennent à la classe 2 et 3

Lesquels défauts acceptables, mais le nombre de défauts à la classe 4 est également élevée,

Et la plupart d’entre eux proviennent de bulle d’air et stone.

5.4.2.1 Rendement de jour

Pour déterminer la valeur de rendement journalier, on utilise la loi suivant :

$$R = \text{Produit fini journalière} \div \text{la tirée journalière}$$

Ou’ nous avons :

Table V.09 : le rendement de la production.

Jour	1	2	3	4	5	6	7	8
PF	382,941	383,811	358,232	406,674	423,675	418,092	409,877	426,630
Tirée	523,517	522,295	523,836	526,721	525,557	525,816	524,15	526,203
Rendement %	73.15	73.49	68.39	77.21	80.61	79.51	78.2	81.02

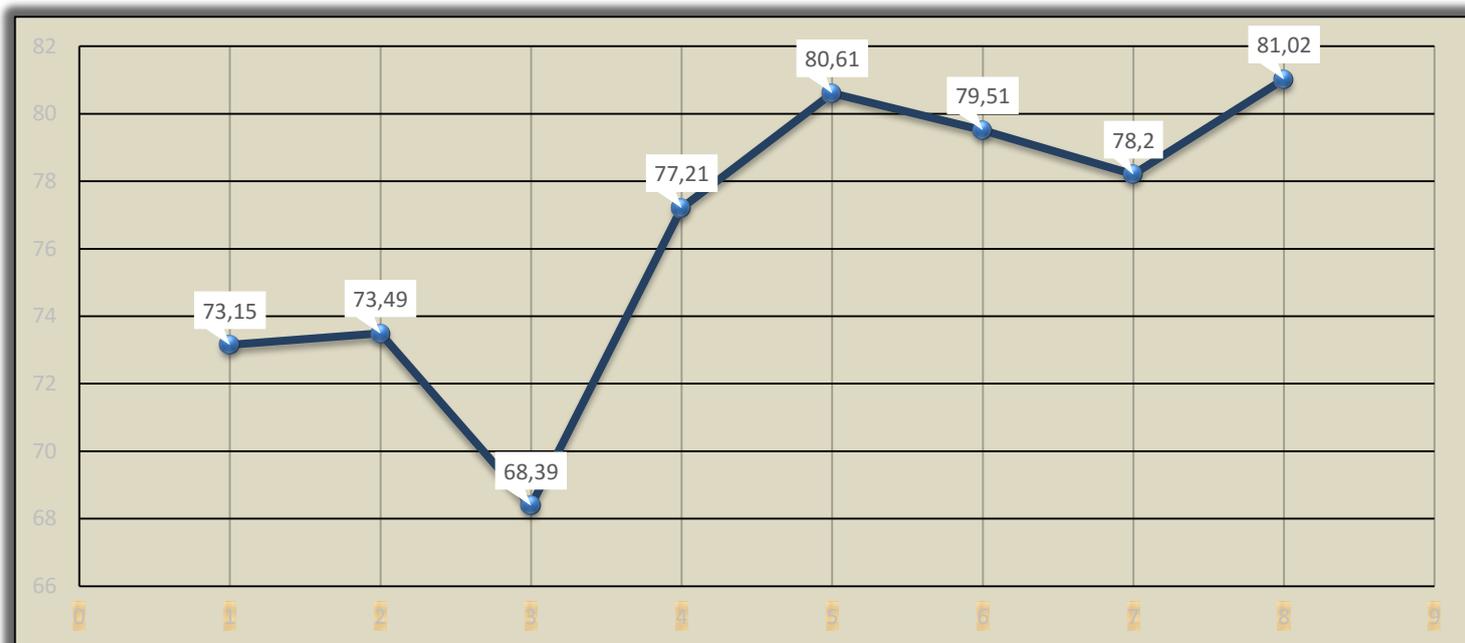


Figure V.23 : la courbe de rendement de production de verre flot en fonction des jours.

Au cours des 08 jours, nous avons enregistré le taux de retour le plus bas le 12/04/2023, tandis que le taux le plus élevé a été enregistré le 17/04/2023.

- On prend en considération :
 Pertes journalières= qualité+ pertes de bords+ maintenance+ saturation+ casses et fissuration + mauvaise découpe+ changement d'épaisseur

Tableau V.10 : le rendement de qualité

Jours	1	2	3	4	5	6	7	8
Rendement de qualité	59.02	59.59	51.98	64.8	67.81	66.69	66.05	69.98

Dans les 4 premiers jours (10, 12, 13 et 14) on a nous nous sommes créé un mauvais rendement de qualité car les raisons suivantes :

- Forte densité de défauts CL2, CL3, CL4 et 05 (pierres, bulles, oxyde d'étain).
- Plusieurs séries des défauts (01h54: séries des défauts côté droit, 10h10 - 14h00: séries des défauts côté droit).

Grâce à l'application de nos solutions proposées dans les jours restants (15, 16, 17 et 18), nous avons pu augmenter le rendement de qualité

Conclusion générale

Conclusion générale

Le suivi de la fabrication nous a permis de mettre le point sur toutes les étapes de fabrication verre float et ainsi d'acquérir une bonne connaissance sur les bonnes pratiques de fabrication et d'enrichir nos connaissances dans le domaine

- Identifier les défauts du verre float par observation au microscope optique et définir leurs Causes dans les différentes étapes de production. Sur les défauts existants, 278 échenillent ont été Détectés :

1. Mauvaise étanchéité.
 2. Moteur linaire pas relié au bain car il était en dommage.
 3. Les gaz des protections ayant une faible qualité.
- Déduire les actions correctives afin de réduire le nombre de défauts pour améliorer le rendement de la production :
 1. Augmenter la quantité des gaz de protection.
 2. Une bonne étanchéité du bain à tout moment est essentielle pour réduire la tendance à la formation.
 3. Augmentez le débit de SO₂ vers le faisceau.
 4. L'augmentation de la teneur en oxygène dans le bain d'étain engendre (créé) une augmentation de la réactivité de l'étain donnant lieu à la formation de SnO/SnO₂.
 - Pour améliorer le rendement de qualité il faut minimiser les défauts supérieurs à CL3.
 - Après la résolution, le rendement de qualité a augmenté 8.78% (équivalent à 57.15 tonnes par jour), avec un bénéfice total estimé à 3450000 DA.

Annexe

Annexe 01 : L'étain

L'étain est un élément rare. Voici ses principales caractéristiques, ses composés ainsi que ses propriétés chimiques et physiques. [27]



Figure VI.1 : Photo de l'étain

Caractéristiques de l'étain

- masse volumique : 7.310 kg/m^3 ;
- masse atomique : $118,710 \text{ u}$;
- configuration électronique : $[\text{Kr}] 5s^2 4d^{10} 5p^2$;
- états d'oxydation : 4, 2 ;
- système cristallin : tétragonal ;
- point d'ébullition : $2.603 \text{ }^\circ\text{C}$;
- point de fusion : $231,9 \text{ }^\circ\text{C}$;
- énergie de fusion : $7,029 \text{ kJ/mol}$;
- énergie de vaporisation : $295,8 \text{ kJ/mol}$;
- électronégativité (Pauling) : 1,96 ;
- chaleur massique : 228 J/ (kg/K) ;
- conductivité électrique : $9,17 \cdot 10^6 \text{ S/m}$;
- conductivité thermique : $66,6 \text{ W/ (m/K)}$;
- premier potentiel d'ionisation : $708,6 \text{ kJ/mol}$;
- deuxième potentiel d'ionisation : $1.411,8 \text{ kJ/mol}$;
- isotopes les plus stables et les plus fréquents :
 - ^{116}Sn : 14,54 % ;
 - ^{118}Sn : 24,23 % ;

- ^{120}Sn : 32,59 %. [28]



Figure VI.2 : Photo de d'étain solide

L'étain est un élément appartenant au groupe IV-b du tableau. Son symbole vient de l'étymologie latine *stannum* : plomb argentifère. On trouve l'étain à l'état natif (Australie, Sibérie), mais le minerai principal est SnO_2 , la cassitérite ; en Bolivie, on rencontre la stannite, $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$.

Propriétés physiques de l'étain

On connaît trois variétés allotropiques de l'étain. La variété stable CNTP est l'étain blanc ou étain b, métal blanc, de densité 7,28, très malléable.

À plus de 161 °C, il se transforme en étain g, fragile, de densité 6,5, qui fond à 232 °C et bout vers 2.270 °C.

À température plus élevée, il s'oxyde en présence d'oxygène pour donner le dioxyde SnO_2 , et finit par brûler avec une flamme blanche.

À basse température (12 à 13 °C), l'étain b se transforme lentement en étain a ou étain gris, de densité 5,75, mais vers -50 °C, la transformation, rapide, le rend pulvérulent : c'est la « peste de l'étain ».

Propriétés chimiques de l'étain

L'étain est peu réducteur. Il résiste bien aux agents atmosphériques, ce qui explique son emploi pour l'étamage. Les acides concentrés attaquent l'étain, qui passe sous forme complexe. Dans ses composés, l'étain peut prendre la valence II (composés stanneux) ou IV (composés stanniques). Les organo étains constituent une catégorie importante de composés : on en connaît plus de 500. [28]

Composés de l'étain

Quelques composés contenant plus de 40 % de Sn (le pourcentage d'étain est indiqué à gauche) :

- 88,1 % : nomarchie, SnO.
- 84,4 % : hydroromarchite, $\text{Sn}_3\text{O}_2(\text{OH})_2$.
- 78,8 % : cassiterite, SnO₂.
- 78,7 % : herzenbergite, SnS.
- 74,7 % : abhurite, $\text{Sn}_3\text{O}(\text{OH})_2\text{Cl}_2$.
- 71,2 % : ottemannite, Sn₂S₃.
- 65,7 % : varlamoffite, (Sn,Fe)(O,OH)₂.
- 64,9 % : berndtite, SnS₂ ;
- 49,4 % : stistaite, SnSb.
- 48,7 % : sorosite, Cu(Sn,Sb).
- 48,4 % : schoenfliesite, MgSn(OH)₆.
- 45,5 % : burtite, CaSn(OH)₆.
- 44,5 % : malayaite, CaSnSiO₅.
- 43,1 % : tetrawickmanite, MnSn(OH)₆.
- 43,1 % : wickmanite, MnSn (OH)₆.

Annexe 02

La classification des défauts selon le type et l'emplacement est indiquée dans le tableau ci-dessous :

Les Tableaux VI.1 A-Nx

Tableau VI. 01 A : classifications des défauts

Echantillon	Date	Heure	Type du défaut	Position du défaut
1	04/04/2023	09h00	Bulle d'air sans sulfate	FI
2	04/04/2023	12h00	Bulle d'air sans sulfate	FI
3	11/04/2023	08h00	Bulle d'air sans sulfate	FS
4	11/04/2023	08h00	Bulle d'air sans sulfate	FS
5	11/04/2023	12h00	Bulle d'air sans sulfate	FS
6	11/04/2023	12h00	Bulle d'air sans sulfate	FS
7	11/04/2023	12h00	Bulle d'air sans sulfate	FS
8	11/04/2023	15h00	Bulle d'air sans sulfate	FS
9	12/04/2023	12h30	Bulle d'air sans sulfate	FS
10	13/04/2023	09h00	Bulle d'air sans sulfate	FS
11	14/04/2023	08h00	Bulle d'air sans sulfate	FI
12	15/04/2023	08h00	Bulle d'air sans sulfate	FS
13	15/04/2023	08h00	Bulle d'air sans sulfate	FS
14	15/04/2023	08h00	Bulle d'air sans sulfate	FS
15	15/04/2023	09h00	Bulle d'air sans sulfate	FI
16	15/04/2023	09h00	Bulle d'air sans sulfate	FS
17	15/04/2023	10h00	Bulle d'air sans sulfate	FI
18	15/04/2023	16h00	Bulle d'air sans sulfate	FS
19	16/04/2023	11h00	Bulle d'air sans sulfate	FS
20	16/04/2023	15h00	Bulle d'air sans sulfate	FI
21	16/04/2023	16h00	Bulle d'air sans sulfate	FS
22	17/04/2023	14h00	Bulle d'air sans sulfate	FS
23	17/04/2023	15h00	Bulle d'air sans sulfate	FS

Tableau VI. 01 B : classifications des défauts

Echantillon	Date	Heure	Type du défaut	Position du défaut
24	18/04/2023	12h00	Bulle d'air sans sulfate	FS
25	19/04/2023	9h00	Bulle d'air sans sulfate	FS
26	19/04/2023	15h00	Bulle d'air sans sulfate	FS
27	19/04/2023	16h00	Bulle d'air sans sulfate	FS
28	19/04/2023	16h00	Bulle d'air sans sulfate	FI
29	20/04/2023	09h00	Bulle d'air sans sulfate	FS
30	12/04/2023	14h00	Bulle d'air avec sulfate	FS
31	13/04/2023	09h00	Bulle d'air avec sulfate	FS
32	10/04/2023	10h00	Quartz	FI
33	10/04/2023	11h00	Quartz	FS
34	10/04/2023	15h00	Quartz	FS
35	12/04/2023	12h00	Quartz	FI
36	14/04/2023	13h00	Quartz	FS
37	14/04/2023	15h00	Quartz	FS
38	20/04/2023	14h00	Quartz	FS
39	11/04/2023	08h00	Corindon	FI
40	11/04/2023	09h00	Corindon	FI
41	11/04/2023	09h00	Corindon	FI
42	11/04/2023	09h00	Corindon	FI
43	12/04/2023	13h00	Corindon	FI
44	12/04/2023	14h00	Corindon	FS
45	12/04/2023	14h00	Corindon	FS
46	13/04/2023	08h00	Corindon	FI

Tableau VI. 01 C: classifications des défauts

Echantillon	Date	Heure	Type du défaut	Position du défaut
47	13/04/2023	11h	Corindon	FI
48	13/04/2023	13h	Corindon	FI
49	13/04/2023	13h	Corindon	FI
50	13/04/2023	13h	Corindon	FS
51	13/04/2023	16h	Corindon	FS
52	14/04/2023	08h	Corindon	FI
53	14/04/2023	09h	Corindon	FS
54	14/04/2023	11h	Corindon	FI
55	14/04/2023	12h	Corindon	FI
56	14/04/2023	14h	Corindon	FS
57	14/04/2023	15h	Corindon	FI
58	15/04/2023	8h	Corindon	FI
59	15/04/2023	8h	Corindon	FI
60	17/04/2023	10h	Corindon	FS
61	18/04/2023	9h	Corindon	FI
62	18/04/2023	14h	Corindon	FI
63	19/04/2023	10h	Corindon	FI
64	19/04/2023	10h	Corindon	FI
65	20/04/2023	08h	Corindon	FS
66	20/04/2023	08h	Corindon	FI
67	20/04/2023	09h	Corindon	FI
68	20/04/2023	09h	Corindon	FI
69	20/04/2023	10h	Corindon	FI

Tableau VI. 01 D : classifications des défauts

Echantillon	Date	Heure	Type du défaut	Position du défaut
70	20/04/2023	10h	Corindon	FI
71	20/04/2023	11h	Corindon	FI
72	10/04/2023	15h	Défomation optique	FS
73	11/04/2023	08h	Défomation optique	FS
74	11/04/2023	08h	Défomation optique	FS
75	11/04/2023	08h	Défomation optique	FS
76	11/04/2023	08h	Défomation optique	FS
77	11/04/2023	08h	Défomation optique	FS
78	11/04/2023	08h	Défomation optique	FS
79	11/04/2023	11h	Défomation optique	FS
80	11/04/2023	11h	Défomation optique	FS
81	11/04/2023	11h	Défomation optique	FS
82	11/04/2023	15h	Défomation optique	FS
83	11/04/2023	15h	Défomation optique	FS
84	11/04/2023	16h	Défomation optique	FS
85	12/04/2023	09h	Défomation optique	FS
86	12/04/2023	15h	Défomation optique	FI
87	14/04/2023	08h	Défomation optique	FS
88	14/04/2023	11h00	Défomation optique	FI
89	14/04/2023	11h00	Défomation optique	FI
90	15/04/2023	08h00	Défomation optique	FS
91	15/04/2023	09h00	Défomation optique	FI
92	15/04/2023	09h00	Défomation optique	FI

Tableau VI. 01 E : classifications des défauts

Echantillon	Date	Heure	Type du défaut	Position du défaut
93	17/04/2023	10h00	Déformation optique	FS
94	17/04/2023	11h00	Déformation optique	M
95	17/04/2023	12h00	Déformation optique	FS
96	17/04/2023	12h00	Déformation optique	FS
97	17/04/2023	13h00	Déformation optique	FI
98	20/04/2023	08h00	Déformation optique	FI
99	20/04/2023	08h00	Déformation optique	FI
100	20/04/2023	16h00	Déformation optique	FI
101	11/04/2023	08h00	Trait linéaire optique	FS
102	11/04/2023	08h00	Trait linéaire optique	FS
103	11/04/2023	08h00	Trait linéaire optique	FS
104	11/04/2023	08h00	Trait linéaire optique	FS
105	11/04/2023	08h00	Trait linéaire optique	FS
106	11/04/2023	11h00	Trait linéaire optique	FS
107	11/04/2023	11h00	Trait linéaire optique	FS
108	11/04/2023	16h00	Trait linéaire optique	FI
109	14/04/2023	08h00	Trait linéaire optique	FS
110	14/04/2023	08h00	Trait linéaire optique	FS
111	14/04/2023	08h00	Trait linéaire optique	FS
112	14/04/2023	08h00	Trait linéaire optique	FS
113	14/04/2023	09h00	Trait linéaire optique	FI
114	14/04/2023	09h00	Trait linéaire optique	FI
115	14/04/2023	09h00	Trait linéaire optique	FI

Tableau VI. 01 F : classifications des défauts

Echantillon	Date	Heure	Type du défaut	Position du défaut
116	14/04/2023	09h00	Trait linéaire optique	FI
117	15/04/2023	08h00	Trait linéaire optique	FI
118	15/04/2023	08h00	Trait linéaire optique	FI
119	17/04/2023	11h00	Trait linéaire optique	M
120	17/04/2023	13h00	Trait linéaire optique	FI
121	10/04/2023	08h00	Pierre d'oxyde d'étain	FS
122	10/04/2023	08h00	Pierre d'oxyde d'étain	FS
123	10/04/2023	16h00	Pierre d'oxyde d'étain	FS
124	10/04/2023	16h00	Pierre d'oxyde d'étain	FS
125	11/04/2023	10h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
126	11/04/2023	10h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
127	11/04/2023	10h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
128	11/04/2023	12h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
129	11/04/2023	14h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
130	11/04/2023	14h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
131	11/04/2023	14h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
132	11/04/2023	15h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
133	11/04/2023	15h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
134	11/04/2023	15h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
135	11/04/2023	16h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
136	11/04/2023	16h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
137	11/04/2023	16h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS

Tableau VI. 01 H: classifications des défauts

Echantillon	Date	Heure	Type du défaut	Position du défaut
138	11/04/2023	16h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
139	12/04/2023	08h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
140	12/04/2023	10h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FI
141	12/04/2023	12h30	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
142	12/04/2023	13h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
143	12/04/2023	16h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
144	12/04/2023	16h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
145	12/04/2023	16h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
146	12/04/2023	16h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
147	12/04/2023	16h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
148	14/04/2023	15h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
149	14/04/2023	16h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
150	15/04/2023	08h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
151	15/04/2023	08h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
152	15/04/2023	08h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
153	15/04/2023	09h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
154	17/04/2023	08h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
155	17/04/2023	08h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
156	17/04/2023	11h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
157	15/04/2023	10h00	Pierre d'oxyde d'étain en corail	FS
158	17/04/2023	09h00	Pierre d'Oxyde d'Etain en corail	FS
159	17/04/2023	09h00	Pierre d'Oxyde d'Etain en corail	FS

Tableau VI. 01 I: classifications des défauts

Echantillon	Date	Heure	Type du défaut	Position du défaut
160	15/04/2023	08h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
161	15/04/2023	09h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
162	17/04/2023	08h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
163	17/04/2023	08h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
164	17/04/2023	11h00	Pierre d'Oxyde d'Etain	FS
165	15/04/2023	10h00	Pierre d'oxyde d'étain en corail	FS
166	17/04/2023	09h00	Pierre d'Oxyde d'Etain en corail	FS
167	17/04/2023	09h00	Pierre d'Oxyde d'Etain en corail	FS
168	15/04/2023	10h00	Pierre d'oxyde d'étain en corail	FS
169	13/04/2023	10h00	Pierre d'Oxyde d'Etain en aiguille	FS
170	13/04/2023	10h00	Pierre d'Oxyde d'Etain en aiguille	FS
171	13/04/2023	11h00	Pierre d'Oxyde d'Etain en aiguille	FS
172	13/04/2023	10h00	Pierre d'Oxyde d'Etain en aiguille	FS
173	13/04/2023	10h00	Pierre d'Oxyde d'Etain en aiguille	FS
174	17/04/2023	15h00	Pierre d'Oxyde d'Etain en aiguille	FS
175	17/04/2023	15h00	Pierre d'Oxyde d'Etain en aiguille	FS
176	17/04/2023	16h00	Pierre d'Oxyde d'Etain en aiguille	FS
177	17/04/2023	16h00	Pierre d'Oxyde d'Etain en aiguille	FS
178	17/04/2023	16h00	Pierre d'Oxyde d'Etain en aiguille	FS
179	17/04/2023	16h00	Pierre d'Oxyde d'Etain en aiguille	FS
180	17/04/2023	16h00	Pierre d'Oxyde d'Etain en aiguille	FS
181	17/04/2023	16h00	Pierre d'Oxyde d'Etain en aiguille	FS
182	17/04/2023	16h00	Pierre d'Oxyde d'Etain en aiguille	FS

Tableau VI. 1 J : classifications des défauts

Echantillon	Date	Heure	Type du défaut	Position du défaut
183	17/04/2023	16h00	Pierre d'Oxyde d'Etain en aiguille	FS
184	17/04/2023	16h00	Pierre d'Oxyde d'Etain en aiguille	FS
185	17/04/2023	16h00	Pierre d'Oxyde d'Etain en aiguille	FS
186	11/04/2023	15h00	Pierre d'Oxyde d'Etain engendrant une déformation optique	FS
187	12/04/2023	08h00	Série de Pierres d'Oxyde d'Etain en aiguillé engendrant une déformation optique	FS
188	12/04/2023	08h00	Série de Pierres d'Oxyde d'Etain en aiguillé engendrant une déformation optique	FS
189	12/04/2023	08h00	Série de Pierres d'Oxyde d'Etain en aiguillé engendrant une déformation optique	FS
190	12/04/2023	09h00	Série de Pierres d'Oxyde d'Etain en aiguillé engendrant une déformation optique	FS
191	10/04/2023	09h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
192	10/04/2023	13h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
193	10/04/2023	13h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
194	10/04/2023	14h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
195	10/04/2023	14h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
196	10/04/2023	15h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
197	10/04/2023	15h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS

Tableau VI. 01 K: classifications des défauts

Echantillon	Date	Heure	Type du défaut	Position du défaut
198	10/04/2023	15h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
199	10/04/2023	16h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
200	10/04/2023	16h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
201	10/04/2023	16h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
202	10/04/2023	16h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
203	11/04/2023	08h00	Tache d' Tache d'Oxyde	FS
204	11/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
205	11/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
206	11/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
207	11/04/2023	09h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
208	11/04/2023	11h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
209	11/04/2023	11h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
210	11/04/2023	12h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
211	11/04/2023	13h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
212	11/04/2023	12h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
213	11/04/2023	15h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
214	11/04/2023	16h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
215	12/04/2023	16h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
216	12/04/2023	16h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
217	13/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
218	13/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
219	13/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
220	13/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS

Tableau VI. 01 L: classifications des défauts

Echantillon	Date	Heure	Type du défaut	Position du défaut
221	13/04/2023	14h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
222	13/04/2023	14h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
223	14/04/2023	15h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
224	14/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
225	14/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
226	14/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
227	14/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
228	14/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
229	14/04/2023	16h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
230	15/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
231	15/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
232	15/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
233	15/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
234	15/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
235	17/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
236	17/04/2023	10h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
237	17/04/2023	10h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
238	17/04/2023	12h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
239	17/04/2023	12h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
240	17/04/2023	13h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
241	17/04/2023	14h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
242	17/04/2023	14h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
243	17/04/2023	14h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI

Tableau VI. 01 M: classifications des défauts

Echantillon	Date	Heure	Type du défaut	Position du défaut
244	17/04/2023	15h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
245	17/04/2023	16h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
246	17/04/2023	16h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
247	18/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
248	19/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
249	20/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
250	20/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
251	20/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
252	20/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
253	20/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
254	20/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
255	20/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
256	20/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
257	20/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
258	20/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
259	20/04/2023	08h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FI
260	20/04/2023	16h00	Tache d'Oxyde d'Etain	FS
261	17/04/2023	16h00	Série de taches d'Oxyde d'Etain	FI
262	11/04/2023	10h00	Tache d'Oxyde d'Etain engendrant une déformation optique	FS
263	20/04/2023	16h00	Tache d'Oxyde d'Etain engendrant une déformation optique	FS
264	12/04/2023	16h00	Laine de verre	FS
265	12/04/2023	16h00	Laine de verre	FS

Tableau VI.01 N: classifications des défauts

Echantillon	Date	Heure	Type du défaut	Position du défaut
266	13/04/2023	08h00	Laine de verre	FS
267	13/04/2023	08h00	Laine de verre	FS
268	13/04/2023	08h00	Laine de verre	FS
269	13/04/2023	08h00	Laine de verre	FS
270	13/04/2023	08h00	Laine de verre	FS
271	13/04/2023	08h00	Laine de verre	FS
272	13/04/2023	11h00	Laine de verre	FS
273	13/04/2023	11h00	Laine de verre	FS
274	13/04/2023	11h00	Laine de verre	FS
275	13/04/2023	12h00	Laine de verre	FS
276	13/04/2023	12h00	Laine de verre	FS
277	13/04/2023	08h00	Griffe de face inférieure	/
278	13/04/2023	08h00	Griffe de face inférieure	/

Annexe 03 : Dioxyde de soufre SO₂

Le dioxyde de soufre, également appelé anhydride sulfureux (nom qui n'est plus employé en chimie), est un composé chimique de formule SO₂. Il s'agit d'un gaz incolore, dense et toxique, dont l'inhalation est fortement irritante. Il est libéré dans l'atmosphère terrestre par les volcans et par de nombreux procédés industriels, ainsi que par la combustion de certains charbons, pétroles et gaz naturels non désulfurés. L'oxydation du dioxyde de soufre, le plus souvent en présence de catalyseurs tels que le dioxyde d'azote NO₂, conduit au trioxyde de soufre SO₃ et à l'acide sulfurique H₂SO₄, d'où la formation de pluies acides. [28]

Elle a pour conséquence une inflammation de l'appareil respiratoire.

Le dioxyde de soufre est utilisé comme désinfectant, antiseptique, antibactérien, gaz réfrigérant, agent de blanchiment, gaz catalyseur pour les noyaux de fonderie dans le procédé Ashland et comme conservateur de produits alimentaires, notamment pour les fruits secs, dans la production de boissons alcoolisées et dans l'élaboration du vin. [29]

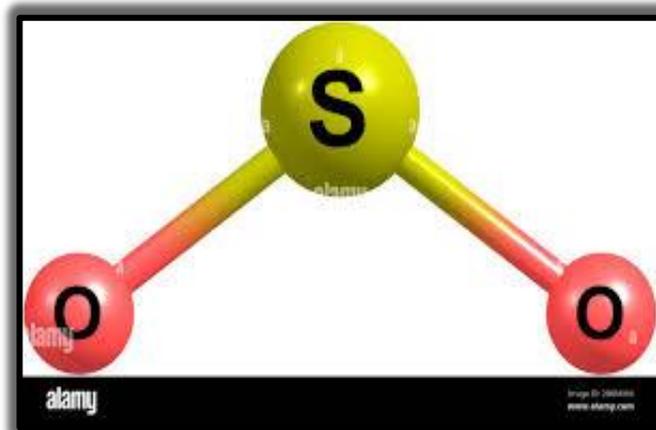


Figure VI.3 : Photo d'une molécule de SO₂

Annexe 04 : Microscope optique

Le microscope en lumière polarisée est un microscope optique dont la technologie repose sur l'utilisation d'un faisceau de lumière polarisée (des ondes vibrant dans un seul plan). Pour assurer la polarisation de la lumière, un polarisateur est placé après la source de lumière, avant l'échantillon.

Le deuxième polarisateur, appelé l'analyseur, est placé perpendiculairement au premier et ne peut donc pas laisser passer la lumière premièrement polarisée.

Par contre, un échantillon placé entre les deux polarisateurs perturbe le faisceau lumineux qui va adopter de nouvelles vibrations dont certaines vont pouvoir traverser l'analyseur. Suivant la particularité de la lumière reçue, il est possible d'identifier et de

Déterminer la composition du défaut observé en comparant avec des photos de référence



Figure VI.4:Photo de microscope optique

➤ **Mode opératoire**

1. Allumer le microscope optique en appuyant sur le bouton de fonctionnement de l'appareil (bouton rouge).
2. Placer le défaut et analyser sur le platine porte-échantillon mobil (rotatif) ce qui permet de balayer l'échantillon et de sélectionner la partie observée.
3. Régler l'intensité lumineuse avec potentiomètre (une lumière trop puissante fatigue les yeux) ainsi qu'on avec un diaphragme de champ que l'on ferme plus ou moins, pour

ajuster le diamètre de la zone éclairée au diamètre de la partie visible de la préparation (champ de microscope).

4. Enregistrer et analyser l'image par photomicrographie.

5. Une caméra liée avec un écran d'ordinateur ouvre la possibilité de prendre des images numériques tout en continuant l'observation binoculaire de l'objet que l'on photographie, ce qui facilite le cadrage, la mise au point et le traitement d'image comme suit :

- Double clic sur logiciel IM500 afin de l'ouvrir
- Cliquer respectivement sur :
 - Acquisition d'image
 - Paramètre la source
 - Acquérir
 - Enregistrer

Annexe 05 : Fluorescence X

La spectrométrie de fluorescence des rayons X est une technique d'analyse chimique utilisant une propriété physique de la matière, bien établie pour la détermination de la composition élémentaire des matériaux solides. Sa rapidité, sa fiabilité et sa précision le rendent extrêmement utile pour le développement / contrôle de processus et l'optimisation de processus et ainsi pour l'analyse chimique des particules étrangères incorporées dans le verre.

En fluorescence X, l'irradiation par un faisceau de rayons X primaire depuis un tube à rayons X provoque l'émission de rayons X fluorescents dotés d'énergies discrètes caractéristiques des éléments présents dans l'échantillon.

Les références

Référence bibliographique:

- [1] A. Renda « Cumulative Cost Assessment of the EU Glass Industry » janvier 1998.
- [2] <https://infovitrail.com/index.php/fr/le-verre>, [consulté le 3 Mars 2023]
- [3] DIJON VITRERIE. Histoire du verre [en ligne]. Disponible au format PDF sur Internet <dijon-vitrierie.fr/images/accueil/histoire_du_verre.pdf>. [Consulté le 5 Mars 2023].
- [4] <https://www.universalis.fr/dictionnaire/figeage/>[Consulté le 10 Mars 2023].
- [5] jean FLAHAUT, « VITREUX ÉTAT », Encyclopédie Universalise [en ligne], consulté le 30 juin 2023. URL : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/etat-vitreux/>[Consulté le 10 Mars 2023].
- [6] Glass Nature, Structure, and Properties Sholze (1991).
- [7] J. Zarzycki, Les verres et l'état vitreux, Ed. Masson, Paris, France, (1982).
- [8] le verre dans le bâtiment par Hamid Zeroub et Mohamed larbi université Mhelmed bougara Boumerdes –Ingénieur d'état en génie des matériaux.
- [9] A.Komar Matériaux et éléments de construction, Ed. Mir, Moscow, (1978).
- [10] J.A.Jouene, Traité de céramiques et matériaux minéraux, Ed. Septima, Paris, (1990).
- [11] J.BARTON, C.GUILLEMET. Le verre Sciences et Technologie. Les Ulis Cedex A: EDP Sciences, 2005.
- [12] Documentation de l'entreprise chinois HNHT société « ligne verre plat » 2010/2011.
- [13] <https://mfg.dz/qualite-securite-et-environnement/>[Consulté le 15 Mars 2023].
- [14] Glas Trösch. Le verre et ses applications. Langenthal: MerkurDruck AG. 2013.
- [15] Selon la norme NF EN 572-1+A1:2016-05)
- [16] M.OUENDI. Rapport de stage de master sciences, technologies, sante, Université Paris-Est Créteil Val de Marne, 2018.
- [17] J.PHALIPPOU. Verres Aspects théoriques Technique de l'ingénieur, 4e édition.2-15.2017.
- [18] Documentation de l'entreprise MFG.
- [19] ventouses M. Yamane et Y. Asahara, « Glasses for Photonics » Press Cambridge University 2000.
- [20] (IN-CQ-01.21 Exigences internes du verre silicate sodo-calcique float clair, colore et Pyrolytique Date d'approbation : 21 Novembre 2021 Version du document : 14).
- [21]A. Amiroche, « Étude du verre Float de l'industrie verrière Méditerranéen Float Glass "MFG" Algérie », diplôme master, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2020/2021.

- [22] Note de qualité « Journal de bord de la production de verre flottant »
- [23] MERAH Hadil Nesrine, LARIBI Khadidja mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie des procédés Université Saad Dahleb BLIDA 1,2022
- [24]<https://www.bohle.com/fr-fr/produits/le-vitrage/outils-de-mesure/4733/appareil-de-mesure-bohle-tincheck-pour-detecter-la-face-d-etain>[Consulté le 20 Mars 2023].
- [25] <https://www.directindustry.fr/prod/systech-illinois>[Consulté le 20 Mars 2023].
- [26] <https://www.isravisio.com/>[Consulté le 21 Mars 2023].
- [27] <https://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/chimie-metal-to>[Consulté le 25 Mars 2023].
- [28]A. F. Holleman et E. Wiberg, « Inorganic Chemistry », Academic Press, San Diego, 2001 (ISBN 0-12-352651-5).
- [29]Norman N. Greenwood et A. Earnshaw, « Chemistry of the Elements », Butterworth-Heinemann 2e éd., p. 700, Oxford, 1997 (ISBN 0-08-037941-9).

