

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 08 Mai 1945

Faculté des Sciences et de la Technologie



Mémoire de fin d'Etude : Master

Département : Génie des procédés

Spécialité : Génie des procédés des Matériaux

Identification et élimination des défauts de fusion du verre float dans l'industrie verrière MFG Algérie

Présenté par :

- ATSAMENIA Isra
- ATAMENIA Rofaida

Encadré par :

Pr. SATHA Hamid

Juin 2024

Dédicace

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point remercier comme il se doit. Ton affection me couvre ta bienveillance me guide et sa 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 mon grand frère tendre Oussama et sa femme Wafaa et leurs enfants Baraa et Ghaith.

A ma sœur unique Soumia et son mari Ali et leur fils Abd el moaiz.

A mes frères Nedjm eddine et Anes.

A ma grande mère.

A tout ma famille Atsamenia et Guetatlia.

A mon chère binôme Rofaida.

A mes copines : Ikram, Hanaa, Meryem, Nada, Wafaa, Asmaa, Dounia, Dhikra, Djihen et Nour.

A tous mes amis et ceux que j'aime et m'aiment, je dédie ce mémoire.

Isra

Dédicace

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point remercier comme il se doit. Ton affection me couvre ta bienveillance me guide et sa 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 ma sœur Nour el houda et son marie Mouhamed abd el mounaim et leur enfants Djinan et ousaid.

A ma chère sœur Marwa et son fiancé Marwan.

A mes cousines Ikram, Nesrin, Rihab, Roumaissa, Isra, Iyed, Akrem, Taim et Youcef.

A ma grande mère et mon grand-père.

A tout ma famille Atamenia et Khelaifia.

A mon chère binôme Isra.

A tous mes copines.

Rofaida

Remerciements

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Pr.SATHA Hamid**, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur, et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Nos remerciement s'adresse à notre Co-promoteur **Mr.DAAS Mustapha** pour son aide pratique et son soutien moral et son partage de connaissances et ses précieux conseils pendant tout la période du stage. Nous voulons également témoigner notre gratitude pour sa patience qui nous ont permis de mener ce projet à bon port.*

Nous tenons à témoigner notre gratitude à tout le staff de la ligne de MFG (Mediterranean Float Glass).

Nous tenons à remercier le corps enseignant et administratif de la faculté Génie des procédés.

Nous tenons à remercier également tous ceux qui nous ont aidés de près et de loin pour l'élaboration de ce mémoire.

En fin merci à tous même s'ils ne retrouvent pas dans cette liste, Ils sont dans notre pensées.

Résumé

Dans ce mémoire de projet de fin d'étude, on explore de manière approfondie les défauts de fusion lors la fabrication du verre Float. L'étude englobe les différents défauts du verre courant de four de fusion qui ont un impact sur le produit fini où nous avons discuté en détail sur ses aspects extérieurs, ses microstructures, ses raisons possibles ce qui est susceptible de se produire lors de l'étape de four de fusion.

C'est pour ces raisons, l'étude s'inscrit dans la logique de vouloir réduire les défauts qui apparaissent dans le ruban de verre. Une fois que les causes des problèmes cités ultérieurement, on a proposé des solutions et des actions correctives au niveau de la ligne de production Float1. Donc un gain qui peut atteindre plusieurs millions de Dinars par année.

Mot clés : Four de fusion, brique réfractaire, défaut, bulle d'air, pierre, rayure, déformation optique, flamme.

Abstract

In this master thesis, we explore in depth the fusion defects during the manufacture of Float glass. The study covers the various defects of glass furnace current which have an impact on the finished product were we discussed in detail on its external aspects, its microstructures, its possible reasons what is likely to occur during the melting stage.

For these reasons, the study is part of the logic of wanting to reduce the defects that appear in the glass ribbon. Once the causes of the problems cited later, solutions and corrective actions were proposed at the level of the Float 1 production line. Thus a gain that can reach several million per year.

Keywords: melting furnace, refractory brick defect, air bubble, stone, scratch, optical deformation, flame.

ملخص

في هذا المشروع لنهاية الدراسة، نستكشف بعمق عيوب الاندماج أثناء تصنيع زجاج. تغطي الدراسة مختلف عيوب تيار الفرن الزجاجي التي لها تأثير على المنتج النهائي أين ناقشنا بالتفصيل جوانبه الخارجية، وهيكله المجهرية، والأسباب المحتملة لما قد يحدث أثناء مرحلة الذوبان .

لهذه الأسباب، تعد الدراسة جزءاً من منطق الرغبة في تقليل العيوب التي تظهر في الشريط الزجاجي . بمجرد ذكر أسباب المشاكل لاحقاً، تم اقتراح الحلول والإجراءات التصحيحية على مستوى خط إنتاج الزجاج المصقول وبالتالي مكسب يمكن أن يصل إلى عدة ملايين في السنة.

الكلمات المفتاحية : فرن الذوبان، الطوب الحراري، العيب، فقاعة الهواء، الحجر، الخدش، التشوه البصري، اللهب.



Sommaire

Table des matières

Introduction Générale.....	01
-----------------------------------	-----------

Chapitre I : Notions de base sur le verre

I-1 Définition du verre	02
I-2 Composition chimique du verre	02
I-2-1 Oxydes formateurs	03
I-2-2 Oxydes modificateurs	03
I-2-3 Oxydes intermédiaires.....	03
I-3 La structure du verre.....	03
I-4 Transition vitreuse	05
I-5 La durabilité chimique.....	06
I-6 Les propriétés du verre	06
I-6-1 Les propriétés rhéologiques	06
La viscosité	06
I-6-2 Les propriétés physiques	08
La dureté	08
La transparence	08
La densité	08
Elasticité.....	08
I-6-3 Les propriétés thermique.....	09
La conductivité thermique	09
La chaleur spécifique	09
I-6-4 Les propriétés chimiques	09
I-6-5 Les propriétés optiques	09
Réfraction et réflexion	09
Absorption des rayons X.....	10
I-7 Les familles du verre	10
I-7-1 Le verre sodo-calcique	10
I-7-2 Le verre borosilicate.....	10
I-7-3 Le verre fluoré.....	10
I-7-4 Le verre de silice	10
I-7-5 Les verre au plomb.....	11
I-7-6 Les vitrocéramiques	11
I-8 Les types du verre fabriqués dans l'entreprise MFG	11

I-8-1 Le verre trempé	11
I-8-2 Le verre feuilleté	12
I-8-3 Le verre à couches.....	12

Chapitre II : Processus de fabrication du verre float

II-1 Description d'une ligne de production du verre plat par flottage	14
II-2 Les étapes de fabrication du verre.....	15
II-2-1 La matière première utilisée (la composition chimique)	15
1) Préparation de la matière première	15
2) Préparation du mélange vitrifiable.....	15
3) Les matières premières et leurs rôles	16
Sable.....	16
Carbonate de soude	16
Dolomie.....	16
Feldspath	16
Charbon.....	17
Sulfate de soude	17
Calcaire	17
Oxyde de fer.....	17
Calcin	17
II-2-2 Enfournement	19
II-2-3 Four de fusion	20
II-2-3-1 Zone de fusion	22
II-2-3-1-1 Corps de fusion	23
II-2-3-1-2 Chambre à régénération	23
II-2-3-2 Zone d'affinage	24
II-2-3-3 La gorge (Homogénéisation).....	25
II-2-3-4 Zone de conditionnement (refroidissement).....	26
II-2-3-5 Transfert de chaleur dans le four	26
II-2-4 Bain d'étain (flottage du verre).....	27
II-2-4-1 Principaux composants du bain d'étain.....	28
II-2-4-1-1 Canal d'écoulement.....	28
II-2-4-1-2 Top rollers	29
II-2-4-1-3 Refroidisseurs.....	30
II-2-4-1-4 Flags	31

II-2-4-1-5 Gaz de protection	32
II-2-4-1-6 Dross- Box	33
II-2-5 L'étenderie (recuit)	34
II-2-6 Découpe et contrôle qualité	36
II-2-7 Stockage.....	37

Chapitre III : Identification et élimination des défauts de fusion

III-1 Paramètres du four de fusion (dans l'industrie MFG).....	39
III-1-1 Flamme.....	39
III-1-2 Pression	40
Causes d'une surpression dans le four	40
Impacts d'une surpression.....	40
Causes de la dépression du four.....	40
Impacts d'une dépression.....	40
III-1-3 Courants convectifs	40
III-1-4 Niveau du verre	41
III-2 Briques réfractaires électrofondues utilisées dans le four de fusion.....	42
III-2-1 Zone de fusion	43
III-2-2 Zone d'affinage	43
III-2-3 La gorge.....	43
III-2-4 Zone de conditionnement	43
III-3 Défauts du verre.....	44
III-3-1 Définition des défauts du verre	44
III-3-2 Classification des défauts	44
III-3-2-1 Défauts d'aspect.....	44
III-3-2-1-1 Défaut ponctuels	44
Bulle d'air	44
Pierre	45
Tache.....	45
III-3-2-1-2 Défauts linéaires ou étendus	45
III-3-2-2 Défauts optiques.....	45
III-4 Défauts du verre courant de four de fusion	46
III-4-1 Défauts « Bulles d'air ».....	46
III-4-1-1 Bulle de décantation.....	46
III-4-1-1-1 Aspect extérieur.....	46

III-4-1-1-2 Microstructure.....	46
III-4-1-1-3 Raison possible	46
III-4-1-1-4 Des mesures à prendre	47
III-4-1-2 Bulle résultant de matériaux réfractaires	47
III-4-1-2-1 Aspect extérieur	47
III-4-1-2-2 Microstructure.....	47
III-4-1-2-3 Raison possible	47
III-4-1-2-4 Des mesures à prendre	48
III-4-1-3 Bulle formée par la fluctuation de surface de liquide du verre	48
III-4-1-3-1 Aspect extérieur	48
III-4-1-3-2 Microstructure.....	48
III-4-1-3-3 Raison possible	48
III-4-1-3-4 Des mesures à prendre	48
III-4-1-4 Bulle d'agitation.....	48
III-4-1-4-1 Aspect extérieur	48
III-4-1-4-2 Microstructure.....	48
III-4-1-4-3 Raison possible	49
III-4-1-4-4 Des mesures à prendre	49
III-4-1-5 Bulle formée par air de dilution	49
III-4-1-5-1 Aspect extérieur	49
III-4-1-5-2 Microstructure.....	49
III-4-1-5-3 Raison possible	49
III-4-1-5-4 Des mesures à prendre	49
III-4-1-6 Bulle de réébullition.....	49
III-4-1-7 Bulle de soude de sulfate	50
III-4-1-8 Bulle d'impureté	50
III-4-2 Défauts « Pierre »	50
III-4-2-1 Pierre de Quartz	50
III-4-2-1-1 Aspect extérieur	50
III-4-2-1-2 Microstructure.....	50
III-4-2-1-3 Raison possible	50
III-4-2-1-4 Des mesures à prendre	51
III-4-2-2 Pierre de Zircon.....	51
III-4-2-2-1 Aspect extérieur	51
III-4-2-2-2 Microstructure.....	51

III-4-2-2-3 Raison possible	52
III-4-2-2-4 Des mesures à prendre	52
III-4-2-3 Pierre de Corindon	53
III-4-2-3-1 Aspect extérieur	53
III-4-2-3-2 Microstructure.....	53
III-4-2-3-3 Raison possible	53
III-4-2-3-4 Des mesures à prendre	54
III-4-2-4 Gouttele de voute	54
III-4-2-4-1 Aspect extérieur	54
III-4-2-4-2 Microstructure.....	54
III-4-2-4-3 Raison possible	54
III-4-2-4-4 Des mesures à prendre	55
III-4-2-5 Pierre de Trydimite et Cristobalite (Cristal de dissection siliceux)	55
III-4-2-5-1 Aspect extérieur	55
III-4-2-5-2 Microstructure.....	56
III-4-2-5-3 Raison possible	56
III-4-2-5-4 Des mesures à prendre	56
III-4-2-6 Pierre de sulfate de soude.....	56
III-4-2-6-1 Aspect extérieur	56
III-4-2-6-2 Microstructure.....	57
III-4-2-6-3 Raison possible	57
III-4-2-6-4 Des mesures à prendre	58
III-4-2-7 Pierre calcaire siliceuse	58
III-4-2-7-1 Aspect extérieur	58
III-4-2-7-2 Microstructure.....	58
III-4-2-7-3 Raison possible	59
III-4-2-7-4 Des mesures à prendre	59
III-4-3 Défauts « Rayures »	60
III-4-3-1 Aspect extérieur	60
III-4-3-2 Microstructure	60
III-4-3-3 Raison de formation	60
III-4-3-3-1 Hétérogénéité chimique	60
III-4-3-3-2 Hétérogénéité thermique.....	61
III-4-3-3-3 Hétérogénéité mécanique.....	61
III-4-3-4 Des mesures à prendre	61

III-4-4 Déformation optique.....	62
III-4-4-1 Aspect extérieur	62
III-4-4-2 Microstructure	62
III-4-4-3 Raison de formation	62
III-4-4-3-1 Hétérogénéité chimique	62
III-4-4-3-2 Hétérogénéité thermique.....	62
III-4-4-4 Des mesures à prendre	63

Chapitre IV: Matériels et méthodes

IV-1 Matériels et méthodes.....	64
ISRAVISION	64
Microscope optique.....	64
Les échantillons des défauts.....	65

Chapitre V: Résultats et discussions

V-1 Analyse des défauts de jour 24/02/2024	66
V-1-1 Analyse des données du système de détection des défauts ISRAVISION.....	67
V-1-2 Résultat	68
V-2 Analyse des défauts de jour 28/02/2024	69
V-2-1 Analyse des données du système de détection des défauts ISRAVISION.....	72
V-2-2 Résultat	73
V-3 Analyse des défauts de jour 29/02/2024	74
V-3-1 Analyse des données du système de détection des défauts ISRAVISION.....	77
V-3-2 Résultat	78
V-4 Analyse des défauts de jour 01/03/2024	79
V-4-1 Analyse des données du système de détection des défauts ISRAVISION.....	81
V-4-2 Résultat	82
V-5 Analyse des défauts de jour 02/03/2024	83
V-5-1 Analyse des données du système de détection des défauts ISRAVISION.....	85
V-5-2 Résultat	86
V-6 Résultat global	87
V-7 Origine des défauts et actions correctives.....	88
Conclusion générale	90

Liste des abréviations

- SiO₂**: Oxyde de silicium.
B₂O₃: Oxyde de bore.
P₂O₅: Pentoxyde de phosphore.
Na₂O: Oxyde de sodium.
Li₂O: Oxyde de lithium.
K₂O: Oxyde de potassium.
TiO₂: Oxyde de titane.
Na₂CO₃ : Carbonates de sodium.
T_g: Température de transition vitreuse.
V: Le volume.
η : La viscosité.
CaCO₃ : Carbonate de calcium.
MgCO₃ : Carbonate de calcium.
Al₂O₃ : Oxyde d'aluminium.
Na₂O : Oxyde de sodium.
SO₃: Trioxyde de soufre
Fe₂O₃ : Oxyde de fer.
MP : Matière première.
C : Calcin.
P(O₂) : Potentiel de l'oxygène.
SnO₂ : Dioxyde d'étain.
AZS : Alumine – Zircon – Silice.
THTZ : Très Haute Teneur de Zircon.
AZS 41 # : Brique avec un pourcentage de zirconium 41%.
AZS 36 # : Brique avec un pourcentage de zirconium 36 %.
AZS 33 # : Brique avec un pourcentage de zirconium 33%.

Liste des figures

Figure I.1: Représentation schématique plan du réseau d'un verre de silicate alcalin	04
Figure I.2: Variation du volume spécifique d'un verre en fonction de la température	05
Figure I.3 : Variation de la viscosité d'un verre sodo-calcique en fonction de la température	07
Figure I.4 : Le verre trempé	11
Figure I.5 : Le verre feuilleté	12
Figure II.1: Schéma illustratif du procédé Float	15
Figure II.2: Schéma représentant les étapes de fonctionnement du verre Float	18
Figure II.3: Le mélange transporté vers le four	19
Figure II.4: Les 8 enfourneuses au sein de MFG	19
Figure II.5: Les différentes zones de four	21
Figure II.6: Schéma montrant la zone de fusion du verre	22
Figure II.7: Schéma de principe du fonctionnement d'un four équipé de brûleurs régénératifs	23
Figure II.8: Le barrage	25
Figure II.9: Le malaxeur	25
Figure II.10: Schéma montrant le bain d'étain dans la fabrication du verre Float	27
Figure II.11: Schéma montrant le canal	28
Figure II.12: Photo représentant le top roll au sein du bain d'étain	29
Figure II.13: Vue extérieur du refroidisseur au sein du MFG	30
Figure II.14: Photo représentant les éléments chauffants au sein du bain d'étain	31
Figure II.15: Schéma montrant la position du flag au sein du bain d'étain	31
Figure II.16: Schéma montrant l'injection des gaz de protection au sein du bain d'étain	32
Figure II.17: Schéma montrant Dross-Box	33
Figure II.18: Vue extérieur du Dross-Box au sein du MFG	33
Figure II.19: Schéma montrant L'étenderie	34
Figure II.20: Vue extérieur de l'étenderie au sein de MFG	35
Figure II.21: Schéma montrant le système de la découpe	36
Figure II.22: Photo montrant le stockage du verre au sein de MFG	37
Figure III.1: Schéma représentatif des courants convectifs du verre dans le four de fusion	40
Figure III.2: Schéma représentatif le système de mesure de niveau du verre	41
Figure III.3: Les briques réfractaires électro fondues utilisées dans chaque zone de four de fusion...	43
Figure III.4: Quartz non fondu	50
Figure III.5: Zircon incliné primaire en œuf	51

Figure III.6: Zircon incliné primaire en grain	51
Figure III.7: Zircon incliné Secondaire	52
Figure III.8: Zircon incliné En grain + cavolinite	52
Figure III.9: Erosion de brique AZS	53
Figure III.10: Corindon (sous la lumière Orthogonale)	53
Figure III.11: Corindon	53
Figure III.12: Cristobalite en forme ossature	54
Figure III.13: Quartz phosphoré en forme plaque	54
Figure III. 14: Cristobalite en ossature	56
Figure III.15: Pierre de sulfate de soude (sous la lumière orthogonale)	57
Figure III.16: Pierre calcaire siliceux en baguette.....	58
Figure III.17: Pierre calcaire en radiation	58
Figure IV.1 : Photographie présentant un appareil d’inspection ISRAVISION	64
Figure IV.2 : Photographie représentant un microscope optique de marque Leica.....	64
Figure IV.3 : Photographie représentant des échantillons des défauts	65
Figure V.1: Histogramme représentant les classes des défauts par ISRAVISION de jour 24/02/2024	67
Figure V.2: Résultat d’analyse des défauts le jour 24/02/2024	68
Figure V.3: Histogramme représentant les classes des défauts par ISRAVISION de jour 28/02/2024	72
Figure V.4: Résultat d’analyse des défauts le jour 28/02/2024	73
Figure V.5: Histogramme représentant les classes des défauts par ISRAVISION de jour 29/02/2024	77
Figure V.6: Résultat d’analyse des défauts le jour 29/02/2024	78
Figure V.7: Histogramme représentant les classes des défauts par ISRAVISION de jour 01/03/2024	81
Figure V.8: Résultat d’analyse des défauts le jour 01/03/2024	82
Figure V.9: Histogramme représentant les classes des défauts par ISRAVISION de jour 02/03/2024	85
Figure V.10 : Résultat d’analyse des défauts le jour 02/03/2024	86
Figure V.11 : Résultat d’analyse global des défauts.....	87

Liste des tableaux

Tableau II.1: Consommation journalière et provenance des matières premières MFG.....	18
Tableau II.2: Les modes de transfert de chaleur dominant dans le four	26
Tableau III.1: Tableau représentatif le pourcentage de chaque constituant dans les briques AZS..	42
Tableau V.1 : Rapport des prélèvements de jour 24/02/2024	66
Tableau V.2 : Les classes des défauts par ISRAVISION de jour 24/02/2024	67
Tableau V.3 : Les types des défauts et leurs fractions de jour 24/02/2024	68
Tableau V.4 : Rapport des prélèvements de jour 28/02/2024	69
Tableau V.5 : Les classes des défauts par ISRAVISION de jour 28/02/2024	72
Tableau V.6 : Les types des défauts et leurs fractions de jour 28/02/2024	73
Tableau V.7 : Rapport des prélèvements de jour 29/02/2024	74
Tableau V.8 : Les classes des défauts par ISRAVISION de jour 29/02/2024	77
Tableau V.9 : Les types des défauts et leurs fractions de jour 29/02/2024	78
Tableau V.10 : Rapport des prélèvements de jour 01/03/2024	79
Tableau V.11 : Les classes des défauts par ISRAVISION de jour 01/03/2024	81
Tableau V.12 : Les types des défauts et leurs fractions de jour 01/03/2024	82
Tableau V.13 : Rapport des prélèvements de jour 02/03/2024	83
Tableau V.14 : Les classes des défauts par ISRAVISION de jour 02/03/2024	85
Tableau V.15 : Les classes des défauts par ISRAVISION de jour 02/03/2024	86
Tableau V.16 : Les défauts global	87



Introduction

générale

Introduction générale

L'histoire du verre remonte à environ 3500 ans en Egypte et en Mésopotamie, où il était utilisé pour la fabrication de perles et d'objets décoratifs. L'invention révolutionnaire du soufflage du verre au 1^{ère} siècle a permis une production en masse d'objets en verre. Pendant l'Empire romain, le verre devenu un matériau très recherché, utilisé pour la vaisselle, les fenêtres et les mosaïques. Au moyen âge, les artisans verriers ont développés des techniques de fabrication complexes, notamment pour la production des vitraux d'églises.

A l'époque moderne, le verre reste un matériau essentiel et polyvalent, présent dans de nombreux domaines. Son histoire témoigne de sa capacité à s'adapter aux besoins changeants de la société. Aujourd'hui la révolution industrielle a transformé l'industrie verrière avec l'introduction des nouvelles technologies, cela a permis plus d'utilisation du verre dans la vie quotidienne.

Notre projet de fin d'étude se focalise sur l'identification et l'élimination des défauts dans le processus de fabrication du verre Float, mené au sein de l'industrie verrière Mediterranean Float Glass (MFG) située à l'Arbaa, wilaya de Blida. Ce travail vise à approfondir la compréhension des défauts potentiels rencontrés lors de la fusion du verre Float, en mettant en lumière les aspects clés de ce processus industriel crucial. Ce mémoire est structuré en cinq chapitres : Le premier chapitre explore les fondements du verre, en abordant ses propriétés physiques, chimiques et ses diverses applications. Une analyse approfondie des caractéristiques du verre permettra de poser les bases nécessaires à la compréhension des défauts de fusion qui peuvent survenir lors de sa fabrication. Le deuxième chapitre se concentre sur le processus de fabrication du verre Float. En examinant les étapes clés de ce procédé, de la fusion des matières premières à la formation du verre en ruban continu, ce chapitre met en lumière les conditions et les paramètres essentiels à la production du verre Float de haute qualité. Le troisième chapitre se focalise sur l'identification et l'élimination des défauts de fusion spécifiques qui peuvent affecter la qualité du verre Float. En analysant les différents types de défauts, tels que les pierres, les bulles, les taches et les rayures. On propose des méthodes d'identification et de classification pour mieux comprendre et résoudre ces défauts. Les deux derniers chapitres de ce mémoire qui concernent les matériels et méthodes avec le résultats et discussion abordent la méthodologie utilisée pour l'identification des défauts de fusion, les résultats obtenus lors de cette étude ouvrent la voie à une discussion approfondie sur les implications de ces résultats. En intégrant les données recueillies avec les connaissances existantes. Ces chapitres offrent une analyse critique des défauts de fusion dans le contexte de fabrication du verre Float.

Cette structure en cinq chapitres permettra une exploration approfondie et méthodique de l'identification et l'élimination des défauts de fusion dans la fabrication du verre Float au sein de l'industrie verrière Mediterranean Float Glass.



Notions



de base



sur



le verre

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les notions de base pour la compréhension de ce matériau fascinant « le verre », un matériau dont la présence et l'importance dans nos vies remontent à des millénaires.

Nous explorerons ses origines anciennes, ses propriétés physiques et chimiques intrigantes, ainsi que ses nombreuses applications contemporaines qui le rendent indispensable dans des domaines aussi variés que la construction, la technologie et l'art. En parcourant ce chapitre, nous découvrirons les secrets de fabrication du verre, son rôle dans l'histoire de l'humanité et les défis et les innovations qui façonnent son avenir.

I-1 Définition du verre

Le verre est un matériau inorganique homogène, un liquide figé. Les molécules sont disposées de manière désordonnée et ne forment pas un réseau cristallin. C'est la raison pour laquelle le verre est transparent. Il n'existe aucune formule chimique du verre. Celui-ci est le résultat de différentes compositions.

Le verre est constitué d'un réseau tridimensionnel irrégulier de chaînes composées des éléments silicium (Si) et oxygène (O) ; (tétraèdres SiO_4) avec des vides et des cations dans les interstices. Il traverse un processus de dévitrification quand on le chauffe entre 800°C et 1100°C et qu'on le maintient un certain temps à cette température. On obtient alors des cristaux de silicium qui, comme par exemple l'obsidienne, précipitent dans la masse vitreuse et donnent au verre une apparence opaque laiteuse. En se réchauffant, il passe progressivement d'un état solide à un état visco-plastique puis liquide.

Lors de sa fabrication, on porte ses différents composants à une température si élevée qu'ils deviennent visqueux, puis on les laisse refroidir. Cette forte viscosité et le processus de refroidissement qui suit ne permettent pas aux ions et molécules de s'ordonner. Le silicate et l'oxygène ne peuvent donc adopter aucune structure ordonnée pour former ensemble des cristaux et c'est cette disposition moléculaire désordonnée [1].

I-2 Composition chimique du verre

Trois grandes catégories de constituants peuvent intervenir dans la composition d'un verre. Il est important pour le verrier de pouvoir connaître la composition exacte des matières premières employées et l'analyse systématique de tous les produits de composition reçus. D'autres acceptent l'analyse des fournisseurs [2].

I-2-1 Oxydes formateurs

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

Généralement ils peuvent facilement donner les verres eux-mêmes. Les sables utilisés dans l'industrie verrière contiennent plus de 99% de SiO_2 avec un taux d'impuretés inférieur à 0.2% [3].

I-2-2 Oxydes modificateurs

Les oxydes formateurs, lorsqu'ils sont à l'état liquide, donnent isolément des verres en se refroidissant à vitesse modérée. Pour le plus commun d'entre eux, SiO_2 , le problème pratique réside dans la température de fusion très élevée de la cristobalite : 1723°C . En outre, à cette température, le liquide est très visqueux. Ce qui rend difficiles les opérations d'élaboration et de mise en forme. Depuis fort longtemps on observe qu'il est possible d'abaisser la température de fusion du cristal et de fluidifier le liquide en ajoutant au sable des produits appelés fondants.

I-2-3 Oxydes intermédiaires

Entre les formateurs et les modificateurs, il existe une autre catégorie d'oxydes dont la fonction est moins nettement définie et qui peuvent jouer, selon la composition du verre, le rôle de formateur ou de modificateur. On les appelle oxyde intermédiaires [4].

I-3 La structure du verre

Le verre est un solide amorphe. Sa structure dérive de celle de la silice. La distance moyenne entre les atomes de silice vitreuse (SiO_2) est d'environ $3,6 \text{ \AA}$ et il n'y a pas d'ordre entre les atomes à des distances supérieures à 10 \AA [5].

L'obtention d'un solide amorphe consiste à un refroidissement rapide de l'état liquide sans cristallisation. Dans des travaux récents sur la structure du verre, les chercheurs ont classé la structure du verre en quatre classes d'arrangement structural [6].

- La première classe c'est l'atome central (Si) et les atomes voisins immédiats en formant les sommets des tétraèdres.
- La classe suivante c'est l'organisation des groupes structuraux autour du groupe central ensemble des unités autour de l'unité centrale.
- La troisième est intermédiaire caractérisée par des arrangements ordonnés de plusieurs atomes distants à partir de l'atome central.

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

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

Ces éléments ne font pas partie du réseau vitreux, mais ils aident à sa dépolymérisation, ces éléments sont insérés entre les tétraèdres et produisent des oxygènes non pontant [7].

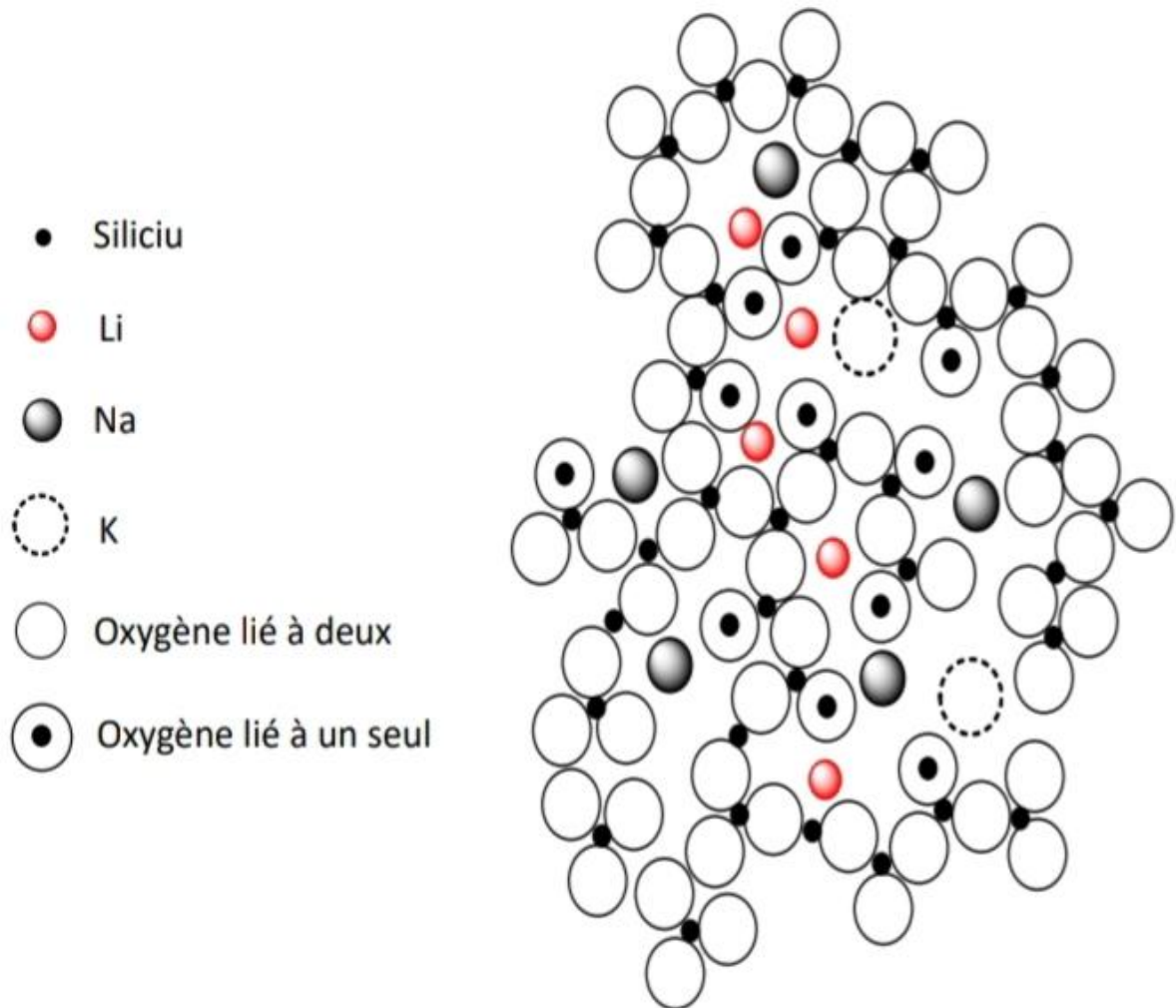


Figure I.1: Représentation schématique plan du réseau d'un verre de silicate alcalin.

I-4 Transition vitreuse

Le phénomène de transition vitreuse est bien illustré par l'évolution du volume en fonction de la température. La (figure I.2) montre schématiquement l'exemple d'un liquide suffisamment visqueux à T_L pour franchir cette température sans cristalliser. On voit sur cette figure que le volume au-dessous de T_L se situe d'abord dans l'extrapolation des valeurs qu'il prend au-dessus de T_L . Mais à la température T_G ou la viscosité atteint environ 10^{12} Pa.S, il y a une diminution significative de la pente de la courbe de variation qui devient proche de celle que présente le solide cristallisé. En revanche à cette température T_G on n'observe pas de changement brutal du volume comme c'est le cas lorsqu'il y a un passage de l'état.

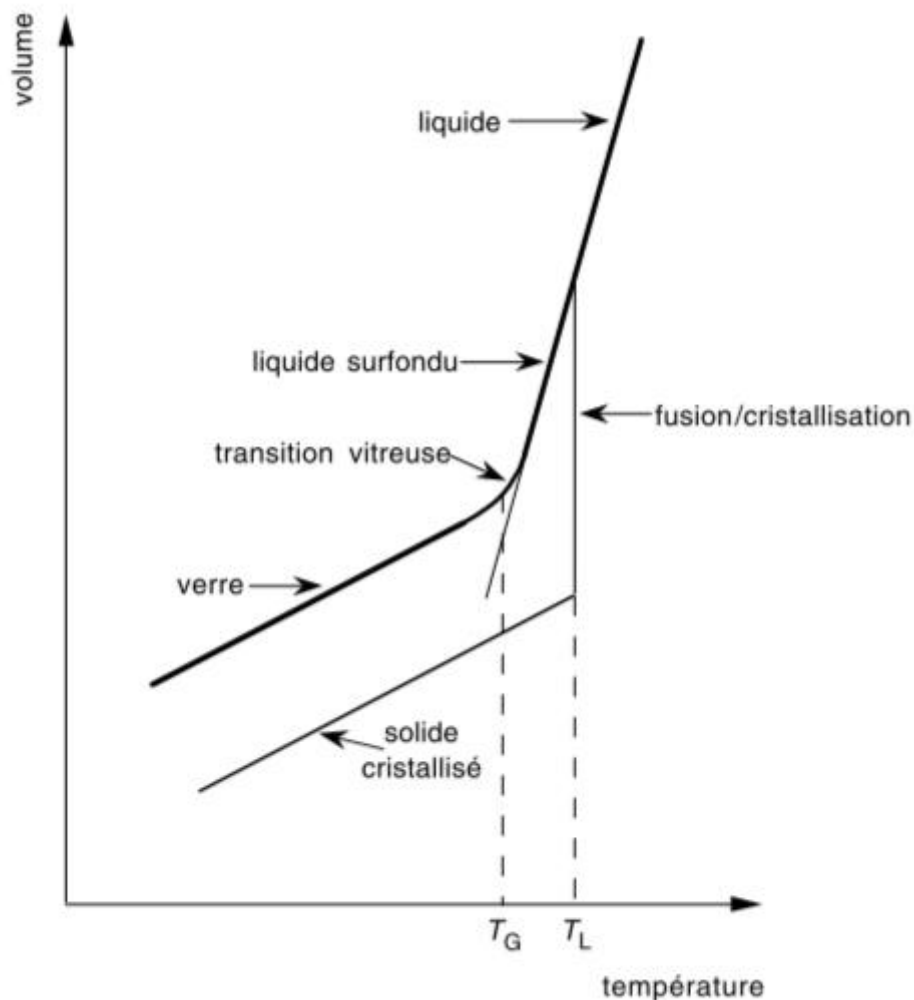


Figure I.2 : Variation du volume spécifique d'un verre en fonction de la température [4].

Pour bien comprendre la transition vitreuse, il faut rappeler trois notions essentielles :

- Un liquide est caractérisé par sa structure c'est-à-dire un arrangement moléculaire propre à chaque température et d'autant plus compact que la température est basse.
- Le temps de mise en équilibre de la structure d'un liquide à une température donnée, qu'on appelle « temps de relaxation » ou plus correctement « temps de retard », est proportionnel à la viscosité.
- La transition vitreuse se produit lorsque la structure n'a plus le temps de suivre la variation de température [4].

I-5 La durabilité chimique

L'expression « durabilité chimique » fait référence à la corrosion produite par l'eau, les atmosphères humides et les agents chimiques en général.

Pour un verre, elle exprime sa résistance à la dégradation dans les solutions aqueuses cette grandeur est généralement rapportée à l'unité de surface de matière par unité de temps.

Les tests de corrosion sont adaptés à la fonction du verre. Mais en général, on exprime sa perte en masse de l'échantillon, par unités de temps et de surface.

La cinétique d'attaque dépend fortement de la température. Il a été montré que l'attaque chimique est environ 10 fois plus forte pour une élévation de température de 20°C et que des verres tout à fait stables à la température ambiante peuvent ainsi subir des dommages considérables à 100°C [8].

I-6 Les propriétés du verre

Le verre est un matériau fascinant doté de propriétés uniques qui en font un élément essentiel dans de nombreuses industries et applications.

I-6-1 Les propriétés rhéologiques

- **La viscosité**

La propriété probablement la plus importante pour la fabrication et le travail du verre est la viscosité ; car de nombreux processus en dépendent [9].

La viscosité η pourra être définie comme un coefficient qui caractérise le frottement interne dans une substance déterminée. 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 [10].

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

- **La fusion:** la viscosité en ralentissant les diffusions, en contrariant les déplacements des molécules et le mélange des produits de dissolution ou de réaction, rend difficile l'achèvement des réactions.

- **L'affinage:** consiste dans l'élimination des gaz occlus dans la masse après fusion (dégazage des bulles).

- **Le façonnage:** elle s'oppose aux déformations que l'on imprime au verre et conserve celles acquises.

- **Le recuit:** elle contrarie le relâchement des tensions internes qui ont pris naissance par refroidissement brusque ou irrégulier au cours du travail et qu'il importe de faire disparaître pour assurer aux pièces leur solidité.

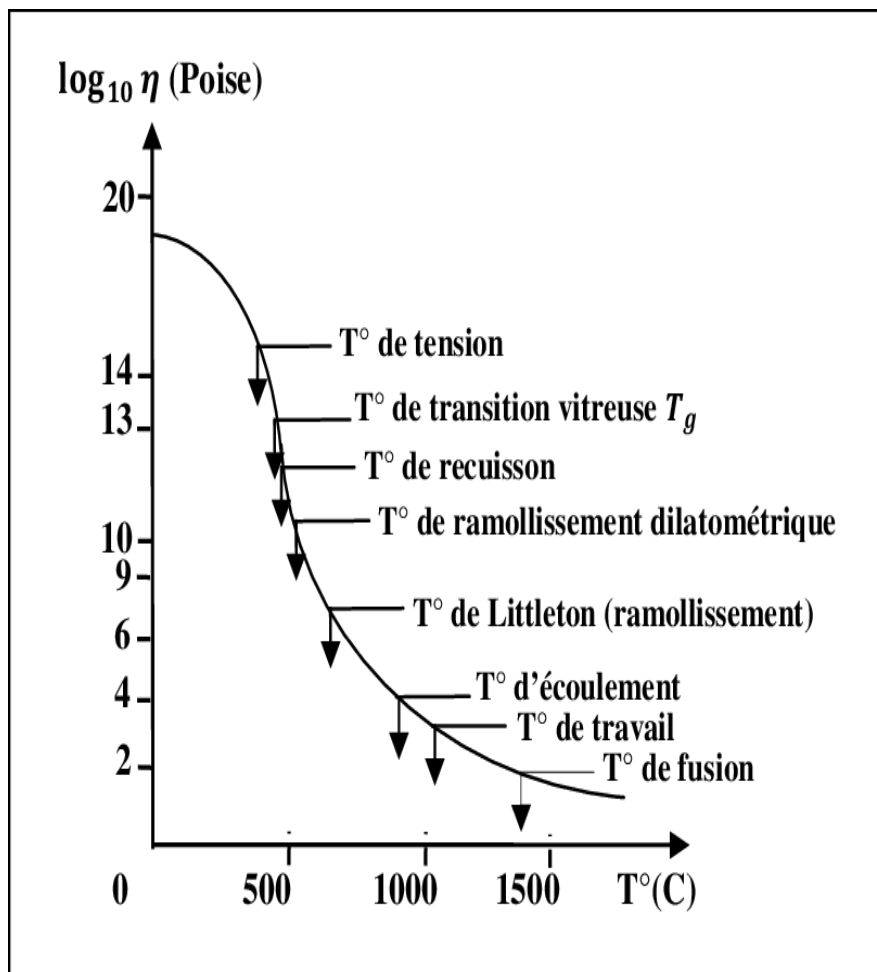


Figure I.3 : variation de la viscosité d'un verre sodocalcique en fonction de la température.

La connaissance de la courbe de viscosité aux basses températures permet de prévoir le traitement thermique approprié pour assurer dans les meilleures conditions le degré de recuit désiré. Comme on peut s'en rendre compte, la viscosité des verres joue un rôle primordial dans leur fabrication : la connaissance exacte des courbes viscosité-température pour un grand nombre de mélanges vitrifiables permettrait de choisir les compositions les mieux appropriées aux diverses fabrications et serait un guide précieux dans les modifications à apporter aux compositions en service pour obtenir des résultats plus complète ou éviter certains aléas.

L'étude poussée de la viscosité des courbes des verres entrainera donc, en fin d'analyse, une augmentation de rendement et par suit une diminution du prix de revient, but vers lequel tendent en général tous les efforts industriels [9].

I-6-2 Les propriétés physiques

- **La dureté**

La dureté d'un matériau est définie comme la résistance mécanique qu'un matériau oppose à la pénétration d'un poinçon.

La dureté du verre se divise en grands types :

- Les verres durs : des verres à faibles coefficients de dilatation thermique qui se ramollissent à température élevée.
- Les verres tendres à coefficients de dilatation élevée qui se ramollissent à une température relativement basse [11].

- **La transparence**

Le verre peut être opaque ou opalescent.

- **La densité**

Elle dépend des composants, elle est d'environ 2.5g/cm^3 . Cela signifie qu'un mètre cube pèse environ deux tonnes et demie ou qu'une feuille d'un mètre carré et d'un millimètre d'épaisseur pèse 2.5Kg [12].

- **Elasticité**

Le comportement élastique d'un solide est le plus souvent caractérisé par le module d'élasticité E appelé aussi module de Young et par le coefficient de poisson.

Les valeurs relativement basses des modules d'élasticité de la silice peuvent s'expliquer par la structure en chaîne du réseau vitreux et par le volume libre important. Sous contrainte de traction, l'allongement microscopique résulte au moins autant de petits changements des angles des liaisons Si-O-Si que de l'étirement des liaisons elles-mêmes [4].

I-6-3 Les propriétés thermiques

- **La conductivité thermique**

Les verres sont des électrolytes solides. Dans les verres courants la d' activité résulte du mouvement des cations monovalent [4].

- **La dilatation thermique**

Coefficient de dilatation linéaire du verre : $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ainsi un vitrage de 2m de longueur s'échauffant de 30°C , s'allongera de 0.54mm [13].

- **La chaleur spécifique**

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

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

I-6-4 Les propriétés chimiques

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

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

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

Il est incombustible.

Il n'est pas décomposé.

Il n'est pas oxydé [14].

I-6-5 Les propriétés optiques

- **Réfraction et réflexion**

On appelle indice de réfraction d'un milieu le rapport des vitesses de propagation de la lumière dans le vide et dans ce milieu. Dans le verre la lumière se propage moins vite que dans le vide. Cette différence de célérité s'explique par la théorie électromagnétique ou l'on admet que la transmission de l'onde lumineuse dans un corps peu conducteur est, comme dans le vide, déterminée par la propagation des oscillations du champ électrique.

- **Absorption des rayons X**

Depuis une vingtaine d'années la connaissance de la structure locale des verres a connu des avancées significatives grâce à la possibilité d'étudier, pour chaque espèce d'atome présente, l'absorption des rayons X en fonction de leur longueur d'onde. On dispose en effet actuellement de rayonnements synchrotrons, qui sont des faisceaux intenses de rayons X émis par des électrons portés à très grande vitesse par l'action conjointe de champs magnétiques et électriques.

I-7 Les familles du verre

I-7-1 Le verre sodocalcique

La famille dont l'usage est le plus répandu est la famille sodocalcique. Actuellement, elle 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.

I-7-2 Le verre borosilicate

Vers 1880, Otton 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.

I-7-3 Le verre fluoré

Du côté de l'infrarouge la limite spectrale de transparence du verre dépend de la plus grande fréquence naturelle des vibrations moléculaires du réseau. Cette fréquence naturelle sera d'autant plus petite que les ions en présence sont plus lourds et moins chargés. Pour pouvoir développer des fibres optiques transmettant l'infrarouge, on a exploré le domaine des verres où l'oxygène serait remplacé par le fluor, dont l'anion monovalent F^- est plus lourd que l'ion divalent O^{2-} .

I-7-4 Le verre de silice

Le verre de silice réunit des qualités exceptionnelles sur le plan de la réfractivité, de la résistance au choc thermique, de la transparence aux rayonnements et de l'inertie chimique. On l'utilise notamment pour les gaines d'éléments chauffants, les ampoules de lampes halogène, les pièces d'optique pour l'ultraviolet et le proche infrarouge, les récipients pour la préparation des semi-conducteurs, les hublots de la navette spatiale.

I-7-5 Le verre au plomb

L'introduction d'oxyde de plomb dans la composition des verres remonte au XVII^e siècle. A cette époque la verrerie anglaise était en difficulté, car les forêts des îles Britanniques étaient peu étendus et le bois était réservé prioritairement à la construction navale. 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.

I-7-6 Les vitrocéramiques

Le verre a naturellement tendance à dévitrifier, mais on est réellement parvenu à contrôler la cristallisation d'un volume du verre qu'au milieu du vingtième siècle. Il semble que la première mention d'une céramisation maîtrisée date de 1954 [4].

I-8 Les types du verre fabriqués dans l'entreprise MFG

Mediterranean Float Glass « MFG » est une entreprise spécialisée dans la fabrication et l'exportation des verres sodocalcique, et ses types sont les suivants :

I-8-1 Le verre trempé

Il s'agit d'un verre ayant subi un traitement thermique de renforcement augmentant considérablement sa résistance aux contraintes mécaniques et thermiques. Il existe pour cela deux procédés : la trempe thermique et la trempe chimique.

La première consiste à chauffer le verre jusqu'à environ 600-650°C avant de subir un refroidissement brutal par jets d'air. Le verre trempé ne peut plus se découper ou se façonner. Si le verre se brise pour une raison quelconque, il se fragmente en de multiples morceaux non coupants, dont la grandeur dépend de l'état de trempe. Ce qui permet de minimiser les risques de blessures profondes, on retrouve les principales applications de ce verre dans le bâtiment.

Un verre trempé peut être 5 fois plus résistant qu'un verre ordinaire [15].



Figure I.4 : Le verre trempé.

I-8-2 Le verre feuilleté

Le verre feuilleté est un élément de verre composé au minimum de deux feuilles et d'une couche intermédiaire élastique, les feuilles étant fortement liées à cette dernière grâce à un processus de fabrication spécifique.

Le verre feuilleté présent après fabrication, comme le verre trempé thermiquement, des écarts de planimétrie [1].

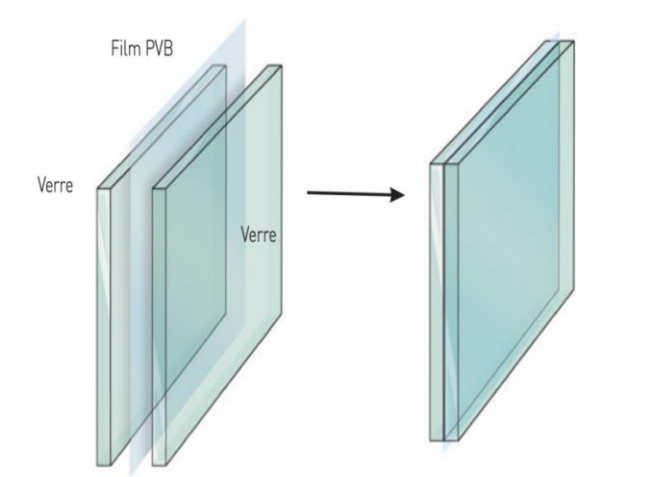


Figure I.5 : Le verre feuilleté.

I-8-3 Le verre à couches

Par définition, les verres à couches sont des produits verriers se types industriels (très généralement des produits élaborés à partir du verre float) qui sont revêtue d'une couche mince, en général composée d'oxydes métalliques. L'épaisseur de cette couche est de l'ordre de 10 à 800 nanomètres. Pour optimiser les performances, la couche peut être constituée d'un empilement de plusieurs sous couches.

Le rôle de cette couche est de modifier le comportement optique, chimique, électrique ou encore mécanique [15].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions de base du verre, nous avons exploré les propriétés fondamentales du verre, sa définition, sa composition chimique, ses propriétés physiques et chimiques, ainsi que ses principales applications dans divers domaines tel que l'architecture, l'industrie, et la technologie. Nous avons également abordé les différents types du verre et leurs caractéristiques distinctives, ce qui nous donne un aperçu complet de ce matériau polyvalent et essentiel dans notre vie quotidienne.



Processus de

fabrication

de verre

float

Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons le processus de fabrication du verre float, une technique qui a transformé l'industrie du verre. Nous explorerons les étapes clés de cette méthode innovante, depuis la fusion des matières premières jusqu'à la formation du produit final.

II-1 Description d'une ligne de production du verre plat par flottage «Float process»

Ce procédé mis au point par la firme anglaise PILKINGTON a provoqué une véritable révolution dans l'industrie du verre plat. Le procédé imaginé au départ consistant à former d'abord un ruban du verre par laminage puis à déposer celui-ci encore à l'état ramolli sur la surface du bain d'étain fondu.

La force en contact avec le métal acquiert la planéité de la surface libre du bain. La force opposée est rendue parfaitement plane grâce à l'action de la tension superficielle qui tend à étaler le ruban du verre sur le bain.

Dans le procédé définitif, on coule maintenant le verre en fusion directement sur le bain au moyen d'un déversoir. L'équilibre des forces de gravitation et de tension superficielle produit une feuille d'épaisseur uniforme, voisine de 6,5 mm quelle que soit la largeur de la bande. Pour réduire l'épaisseur, on est amené à exercer une traction en empêchant les bords de se rapprocher, par des dispositifs spéciaux.

Le ruban du verre quitte le bain pénétrer dans un tunnel de révision. L'avantage principal de ce procédé est de permettre d'atteindre d'emblée une qualité optique élevée.

La planéité approchant celle de la glace et ceci sans nécessiter un polissage ; de plus, la vitesse de sortie est de 5 à 10 fois plus élevée que la vitesse d'étirage du verre à vitre.

Par contre, l'installation nécessite un contrôle de l'atmosphère au-dessus du bain qui doit être neutre ou faiblement réductrice pour éviter l'oxydation du bain et maintenir la tension superficielle dont dépend l'épaisseur de la feuille [2].

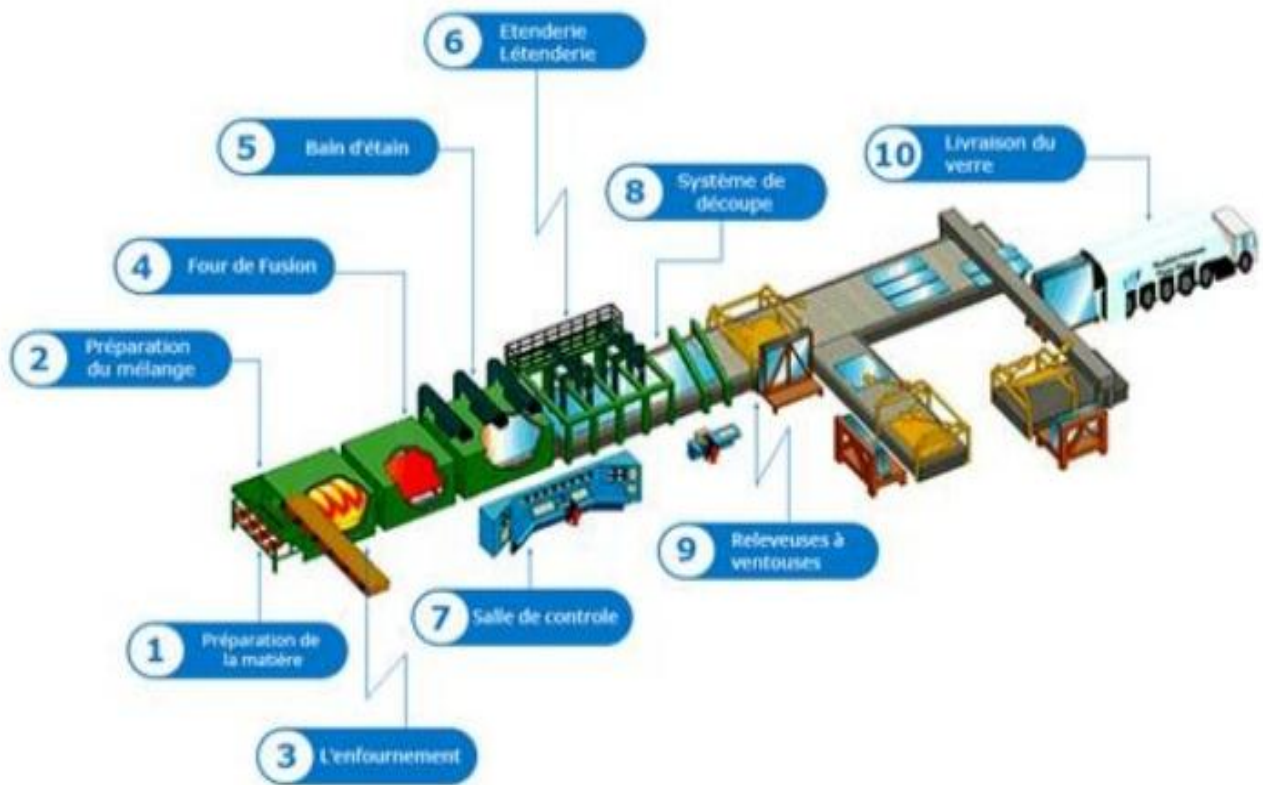


Figure II.1: Schéma illustratif du procédé Float.

II-2 Les étapes de fabrication du verre

II-2-1 La matière première utilisée (la composition chimique)

La matière première sera stockée dans les silos de l'atelier de composition et des installations de stockage qui sont prévus pour une capacité de fonctionnement de 72 heures minimum avec un stockage complémentaire au sol d'un mois pour la soude, le sulfate et les autres matériaux.

1) **Préparation de la matière première:** Un contrôle rigoureux est assuré pour chaque matière première avant son enfournement selon des standards internationaux reconnus.

- Analyse chimique
- Granulométrie
- Humidité
- Impuretés

2) **Préparation du mélange vitrifiable:** Composé de toutes les matières premières entrant dans fabrication du verre Float. Ces matières sont stockées dans des silos liés à des balances : La balance (n°1) pour le sable, la balance (n°2) pour la soude et la dolomie, le

calcaire et le feldspath sont liés à la balance (n°3), la balance (n°4) pour le sulfate, le charbon et l'oxyde de fer dans la balance (n°5). Après la pesée, la matière première est transportée vers le malaxeur avec un tapi roulant sous forme de couche (forme sandwich) et on commence par le sable (balance n° 1) jusqu'aux oxydes de fer (balance n° 5). La matière première est mélangée à sec pendant 40 secondes, puis mélange humide pendant 105 secondes avec l'ajout de l'eau chaude à température entre 80-90°C, avec une température de mélange entre 33°C et 35°C et une humidité entre 4 et 4.5%. Après les 145 secondes les matières premières se mélangent avec le calcin traité et envoyées vers une trémie d'enfournement qui est collectée au four [16].

3) Les matières premières et leurs rôles

- **Sable**

Le sable est une roche naturelle riche en silice (formateur de réseau du verre). Densité apparente est de 1,5 et densité réelle est de 2,65. Le sable est la principale matière première 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 et il est la plus difficile à fondre et à incorporer au liquide pour que la fusion soit économique, il faut ajouter un fondant, tel que l'oxyde de sodium, pour réduire la température de fusion [17].

- **Carbonate de soude**

Le carbonate de soude (Na_2CO_3) est principale source d'oxyde de sodium Na_2O , qui est l'alcalin le plus employé comme un oxyde modificateur, qui dépolymérise le réseau des oxydes formateurs, abaisse la température de fusion, augment le coefficient de dilatation et la conductivité électrique. De densité apparente 1,11 et densité réelle 2,53 [18].

- **Dolomie**

La source habituelle en est la dolomie lorsque l'oxyde de calcium est également inclus dans la composition, sinon l'on emploie la magnésie elle-même.

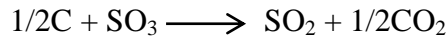
Le magnésium et le calcin ont généralement des fonctions similaires dans le verre, mais les verres à mélange calcium/ magnésium sont moins sujets à la dévitrification. De densité apparente 1,7 et densité réelle 2,9 [2].

- **Feldspath**

Le feldspath est un silicate double d'alumine et de potasse, ou de soude, ou de chaux. C'est une source d' Al_2O_3 mais aussi un apport intéressant de Na_2O , de K_2O . Densité apparente est de 1,2 et densité réelle 2,55. L'oxyde d'aluminium, Al_2O_3 , est ajouté afin d'améliorer la résistance chimique et d'augmenter la viscosité à basse température.

- **Charbon**

Le charbon contient environ 80% de carbone. Un excès de charbon dans la composition engendre des hétérogénéités chimiques siliceuses. Un manque de charbon provoque des bouillons de sulfate. Il est considéré comme un agent de réduction intervenant dans les phénomènes de fusion par réaction avec le sulfate de sodium:



- **Sulfate de soude**

Le sulfate de soude (Na_2SO_4) est ajouté en tant qu'agent affinant et oxydant, et constitue une source secondaire d'oxyde de sodium. Un excès de sulfate dans la composition engendre des bouillons de sel et une corrosion des réfractaires. Un manque de sulfate provoque des ségrégations siliceuses. Il est encore présent dans la composition en petite quantité compte-tenu de son rôle dans les phénomènes de fusion et d'affinage. De densité apparente 1,32 et densité réelle 2,70.

- **Calcaire**

Le calcaire est une roche naturelle riche en chaux (55 à 56% CaO , stabilisant de réseau du verre) blanche ou grise. Permet d'ajuster la teneur en calcium du verre produit. De densité apparente 1,6 et densité réelle 2,71.

- **Oxyde de fer**

L'oxyde de fer (Fe_2O_3) est utilisé comme colorant (couleur verte, apporte de chaleur), il donne une teinte verdâtre (Fe_2O_3) ou un couleur marron (FeO) et comme régulateur de la transmission lumineuse du verre avec des faibles quantités.

- **Calcin**

Le calcin (verre broyé) est considéré comme une matière première (fondant), de plus en plus importante, dans la fabrication du verre. Il est utilisé pour deux raisons ; d'une part l'aspect non polluant et recyclable et d'autre part, la fusion du calcin consomme moins d'énergie que le mélange vitrifiable [4].

Tableau II.1: Consommation journalière et provenance des matières premières MFG.

Matière première	Teneur moyenne	Humidité %	Tonnage journalier	Unité	Provenance
Sable siliceux	56,29%	4,00%	413,776	Tonne	Ain Oussara/Tebessa
Carbonate de sodium	18,46%	0,10%	130,6	Tonne	Espagne/ USA
Dolomie	17,13%	0,10%	121,219	Tonne	Ain M'lila
Calcaire	3,18%	0,10%	22,483	Tonne	El-Khroub-Constantine
Feldspath	4,13%	0,10%	29,187	Tonne	Espagne
Sulfate de sodium	0,76%	0,50%	5,384	Tonne	Espagne
Charbon	0,03%	0,50%	227,29	Kg	Espagne
Oxyde de fer	0,02%	0,10%	117,437	Kg	Espagne
Calcin	20%	//	144	Tonne	100% interne- MFG

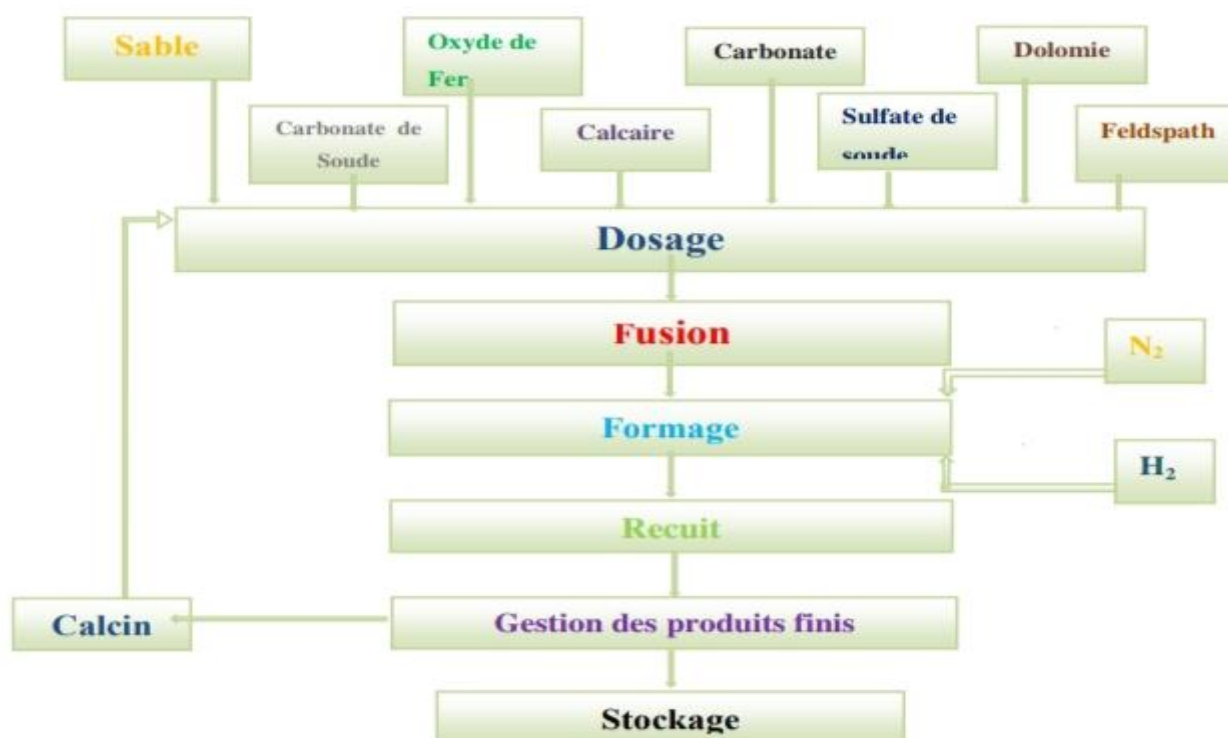


Figure II.2: Schéma représentant les étapes de fonctionnement du verre Float.



Figure II.3: Le mélange transporté vers le four.

II-2-2 Enfournement

Tout d'abord, un four verrier est constitué d'une zone d'enfournement qui reçoit le mélange vitrifiable pulvérulent composé de matières vitrifiantes. Elle est le siège de forts gradients thermiques, venant de la différence de température entre les réfractaires chauds (1200°C) et la matière première à température ambiante. A l'attaque chimique par le verre vient s'ajouter l'érosion associée au caractère abrasif des poudres [2].



Figure II.4: Les 8 enfourneuses au sein de MFG.

II-2-3 Four de fusion

Les fours de verrier sont de différents types (électrique, régénérateur, récupérateur etc.....). Ils sont considérés comme étant les cerveaux des lignes de production du verre, afin de les préserver et maintenir leurs temps de vie (10 ans), pour cela toute une équipe composée de plusieurs membres est mobilisée.

Au sein de MFG en utilisent le four de type régénérateur à flamme transversale dans la ligne de production, spécifiée par sa structure qui a pour le maintien de la température entre 1500 et 1600°C ce qui est primordial pour prévenir toute détérioration du verre.

La transformation des matières premières en verre s'effectue dans un four à bassin en matériaux réfractaires, par chauffage à la température de 1550°C (une des températures les plus hautes de l'industrie), la température est contrôlée en permanence par un pyromètre. Dans le cas du procédé "Float", le four contient en moyenne 2000 tonnes du verre en fusion, soit la production de 2 à 3 jours.

La fusion du verre pour la ligne « Float » sera assurée par un four à régénérateur à brûleurs transversaux, et 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 1200°C.

Le verre fondu est affiné et homogénéisé et ensuite conditionné à température contrôlée avant d'arriver au bain d'étain, pour assurer un bon fonctionnement, le four est équipé de dispositifs automatiques de mesure enregistrement et régulation de pression et niveau du verre, d'un système de minuterie et d'inversion automatique de la flamme, d'instrument de mesure, enregistrement et régulation de température aux différents endroits du four et d'un dispositif de régulation de pression et de gaz naturel.

Les fumées sont évacuées par tirage naturel par une cheminée. Pour protéger l'environnement, les fumées passeront par un équipement de dépollution à tirage forcé conçu en fonction de la réglementation locale.

❖ **Caractéristiques du four**

- Four à régénérateurs latéraux, transversaux (06 chambres de chaque côté).
- Longueur : 64.5m.
- Largeur : 30.5m.
- Capacité du four: 2050 tonnes.
- Température maximale : 1590° C.
- Température de sortie : 1100° C.
- Durée de vie du four : entre 10 ans jusqu'à 13 ans.

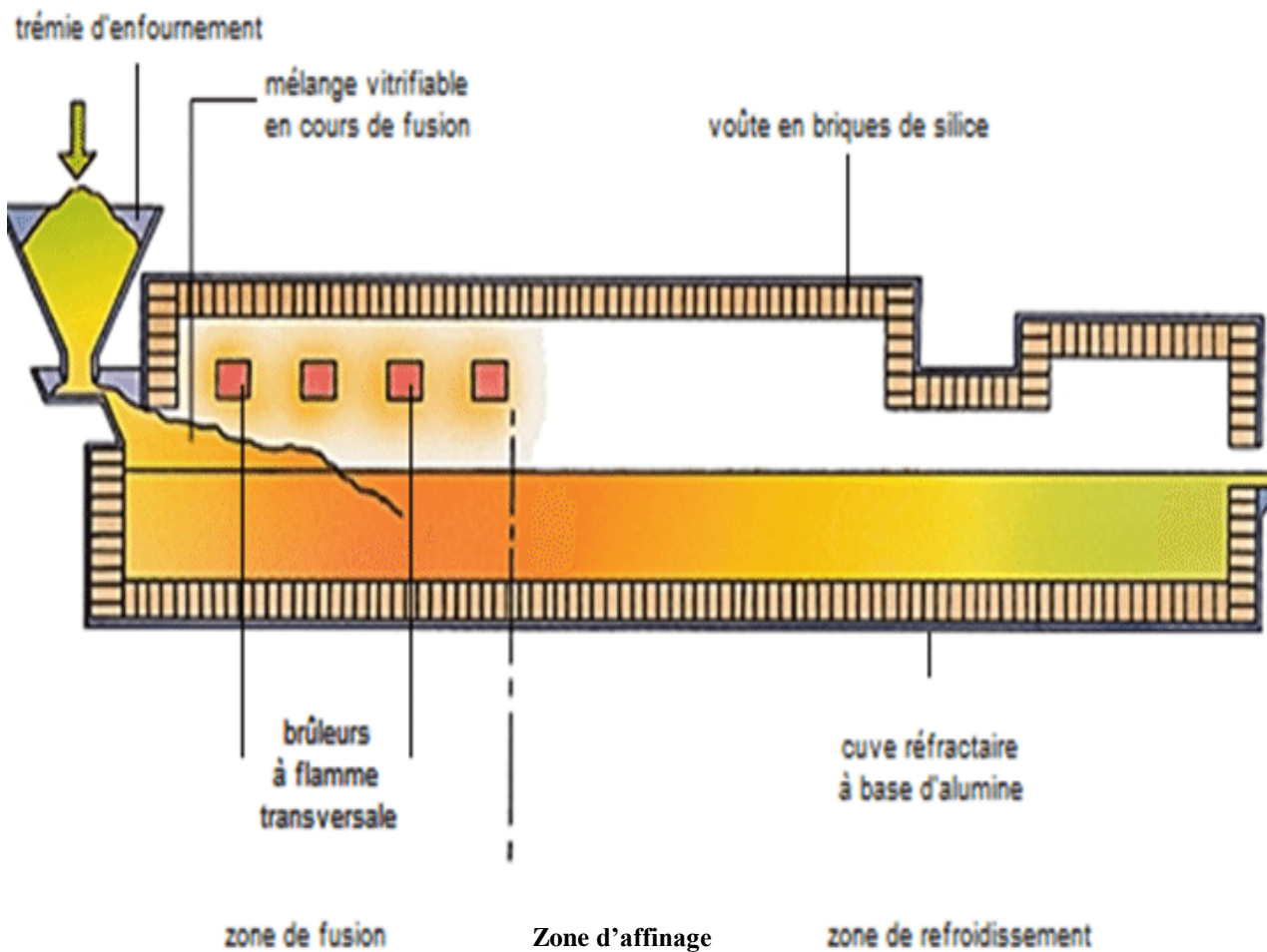


Figure II.5: Les différentes zones de four.

Cette conception répond aux différentes étapes d'élaboration du verre, qui se décompose en différentes phases (Fusion, Affinage, Conditionnement (refroidissement)) auxquelles correspondent différentes zones [16] .

II-2-3-1 Zone de fusion

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

LA FUSION DU VERRE

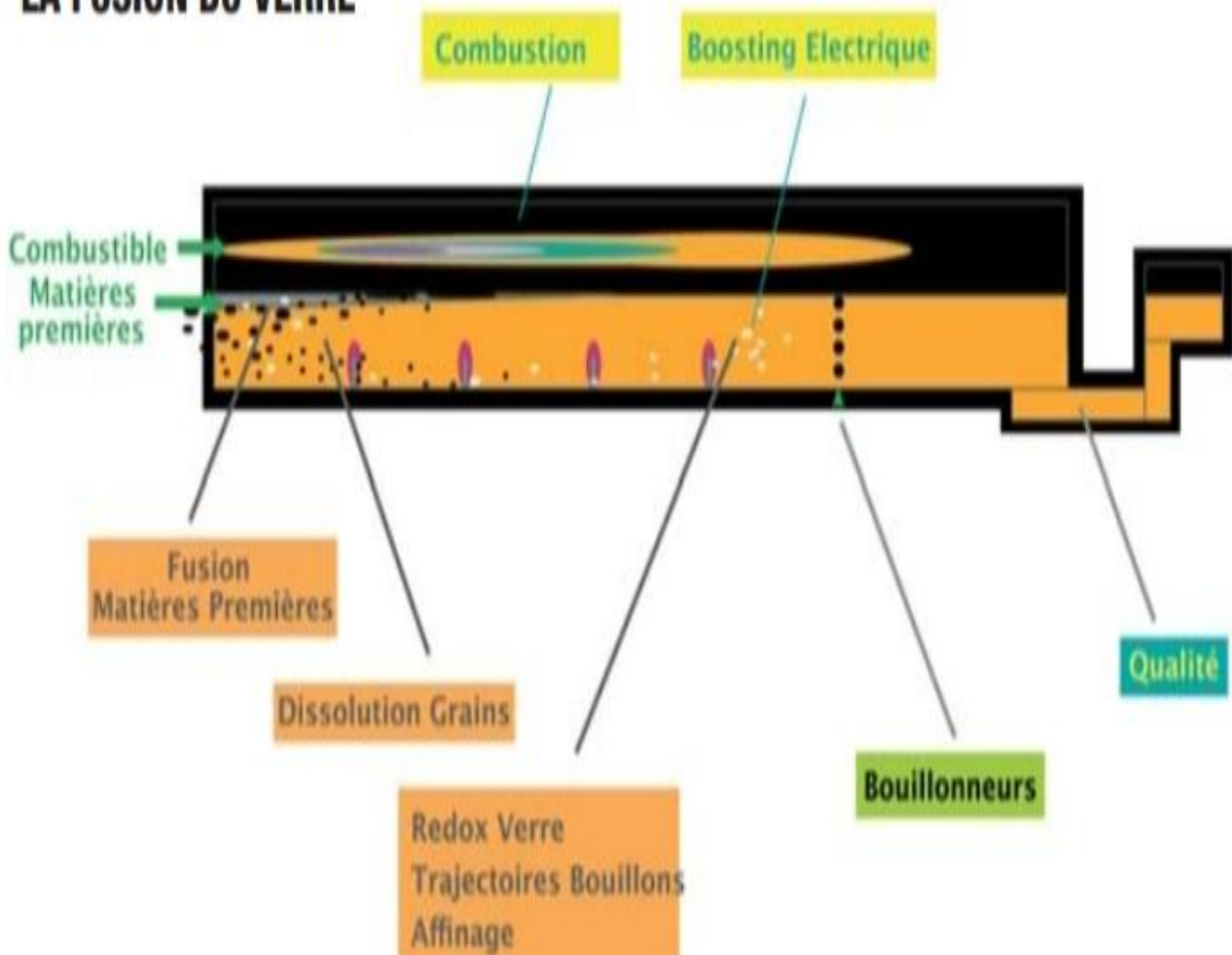


Figure II.6: Schéma montrant la zone de fusion du verre.

II-2-3-1-1 Corps de fusion

C'est un bassin où se trouve le volume du verre généralement appelé paroi de cuve. Il est constitué en briques AZS (alumine, zirconium, silice), sur-plantées par une voûte en briques de silice. Sur chaque côté il y a six chambres de régénération où ports, avec 03 injecteurs à flamme horizontale et à haute pression. Sauf le dernier port, il en a deux.

Ces injecteurs permettent l'introduction du gaz CH_4 pour l'allumage des flammes qui peuvent atteindre une longueur de 8m, soit $\frac{3}{4}$ de la longueur du four.

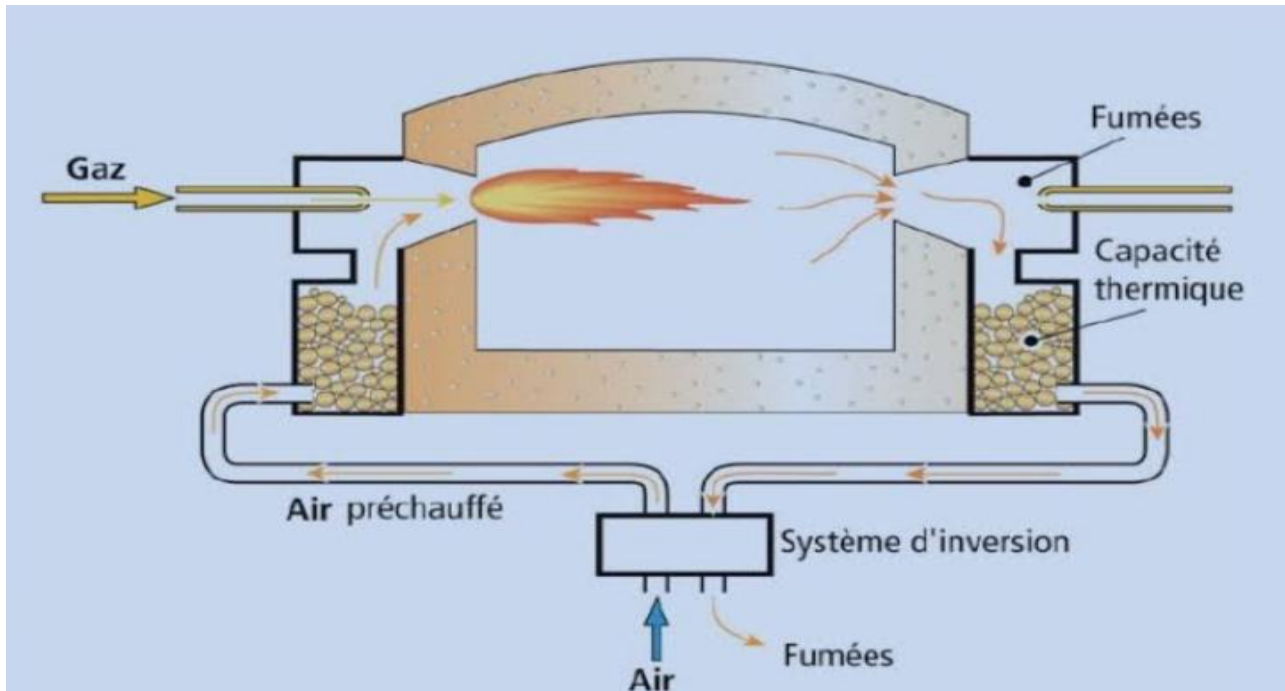


Figure II.7: Schéma de principe du fonctionnement d'un four équipé de brûleurs régénératifs.

II-2-3-1-2 Chambre à régénération

Les chambres de régénération sont reliées au four par les colliers de brûleurs, qui sont conçus d'une couche interne de brique en silice et d'une couche externe de brique en aluminium.

Les colliers permettent la circulation de l'air (O_2) et l'évacuation des fumées vers l'extérieur. Les chambres de régénération sont conçues en briques d'empilage à l'intérieur qui supportent des températures atteignant les 1500°C . Elles fonctionnent suivant l'allumage de la flamme, elle permet l'alimentation de la flamme en O_2 d'un côté, et permet d'évacuer la fumée et maintenir la brique chaude par la chaleur de l'autre côté d'où le terme de régénérateur. L'inversion est assurée par un système mécanique qui permet d'inverser la flamme de part et d'autre chaque 20 minutes. Les fumées sont évacuées dans un long couloir appelé carneau principal vers une cheminée d'une longueur de 82.5 mètres [16].

II-2-3-2 Zone d'affinage

Les quantités importantes de CO_2 formées vont en partie se solubiliser dans le bain du verre et en partie s'éliminer sous formes de bulles gazeuses en mouvement ascensionnel à l'intérieur du bain du verre : c'est la phase d'affinage du verre. Pour accélérer cette phase, souvent longue à cause de la viscosité élevée du verre fondu, une réaction tardive du sulfate de sodium ou calcium se produit. Vers 1400°C : $\text{Na}_2\text{SO}_4 \longrightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{SO}_2 + 1/2\text{O}_2$. Ou plus tôt en présence de réducteurs comme le charbon $2\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{C} \longrightarrow 2\text{Na}_2\text{O} + 2\text{SO}_2 + \text{CO}_2$.

Avec formation de bulles de SO_2 , pour produire des bulles assez grosses qui vont par coalescence, entraîner les bulles résiduelles de CO_2 . Il est aussi possible d'avoir recours à un bouillonnage mécanique, grâce à des tubes (appelés bouillonneurs) placés au fond des fours et alimentés en air.

- **Réaction d'Oxydo-Réduction :**

Les matières premières pendant leur réaction chimique au sein du bain auront :

- Soit un pouvoir plutôt oxydant, c'est-à-dire capables de générer de l'oxygène actif.
- Soit un pouvoir plutôt réducteur, c'est-à-dire capables de consommer de l'oxygène.

Enfin d'élaboration du verre aura ainsi un pouvoir oxydo-réducteur global, mesurable :

- Soit directement par une sonde électrochimique : on parlera d'un potentiel oxygène $\text{P}(\text{O}_2)$
- Soit indirectement par le calcul du rapport $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, ou Fe^{2+}/Fe total.

Ce paramètre redox va jouer un rôle important sur la couleur du verre :

- Le verre blanc sera généralement oxydé (nombre redox = +5) : le soufre résiduel sera alors sous la forme sulfate $(\text{SO}_4)^{2-}$ avec un rapport Fe^{2+}/Fe total égal à environ 10 %.
- Le verre ambre sera toujours très réduit (nombre redox = -23) : le soufre résiduel, sera alors sous la forme sulfure S^{2-} avec un rapport $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ égal à environ 80 % [19].

II-2-3-3 La gorge (Homogénéisation)

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 un malaxeur horizontal qui assure l'homogénéisation du liquide [16].



Figure II.8: Le barrage.



Figure II.9: Le malaxeur.

II-2-3-4 Zone de conditionnement (refroidissement)

Une zone de travail ou de conditionnement thermique permet ensuite le refroidissement du mélange jusqu'à une température où la viscosité du verre sera adaptée à sa mise en forme (typiquement entre 1300 et 1000°C). Cette partie est composée de canaux de distribution ou «feeders» qui servent à l'approvisionnement en verre des machines et assurent son homogénéité thermique. Elle est aussi appelée zone de repos ; dans cette zone le verre est tellement clair qu'on peut voir la réflexion de la voute. Le réglage de la température se fait par injection d'air filtré [20].

II-2-3-5 Transfert de chaleur dans le four

Les modes de transfert de chaleur dominant dans les fours à flammes transversaux sont le rayonnement puis la conduction et la convection qui est presque nulle.

Tableau II.2: Les modes de transfert de chaleur dominant dans le four [21] .

	Rayonnement	Conduction	Convection
Flamme- voute	X		X
Flamme- verre	X		X
Différentes couches du verre		X	
Paroi du four- verre		X	
Paroi- air chaud	X		X
Différente couches de la paroi		X	

II-2-4 Bain d'étain (flottage du verre)

Dans le processus de flottage, un ruban continu du verre sort de four de fusion et flotte le long de la surface d'un bain fermé d'étain fondu. Du fait que le verre est moins dense que l'étain, (à 1100 °C la densité du verre de 2,3~2,5 g/cm³ et celle de l'étain est de 6,5~7,3 g/cm³). Le ruban est maintenu dans une atmosphère chimiquement contrôlée à une température suffisamment élevée pendant assez longtemps pour que les irrégularités fondent et que les surfaces deviennent plates et parallèles. Comme la surface de l'étain fondu est parfaitement plate, le verre devient également plat.

Le ruban est ensuite refroidi tout en avançant à travers l'étain fondu jusqu'à ce que les surfaces soient assez dures pour être retirées au bain sans que les rouleaux ne marquent la surface inférieure; ainsi un ruban est produit avec une épaisseur uniforme et des surfaces brillantes polies au feu sans besoin de polissage.

Afin d'éviter la contamination de l'étain, les fabricants proposent une solution pour isoler le bain d'étain qui est un système étanche avec une atmosphère contrôlée composée d'azote et d'hydrogène dont la consommation est respectivement 1600m³/h et 130m³/h.

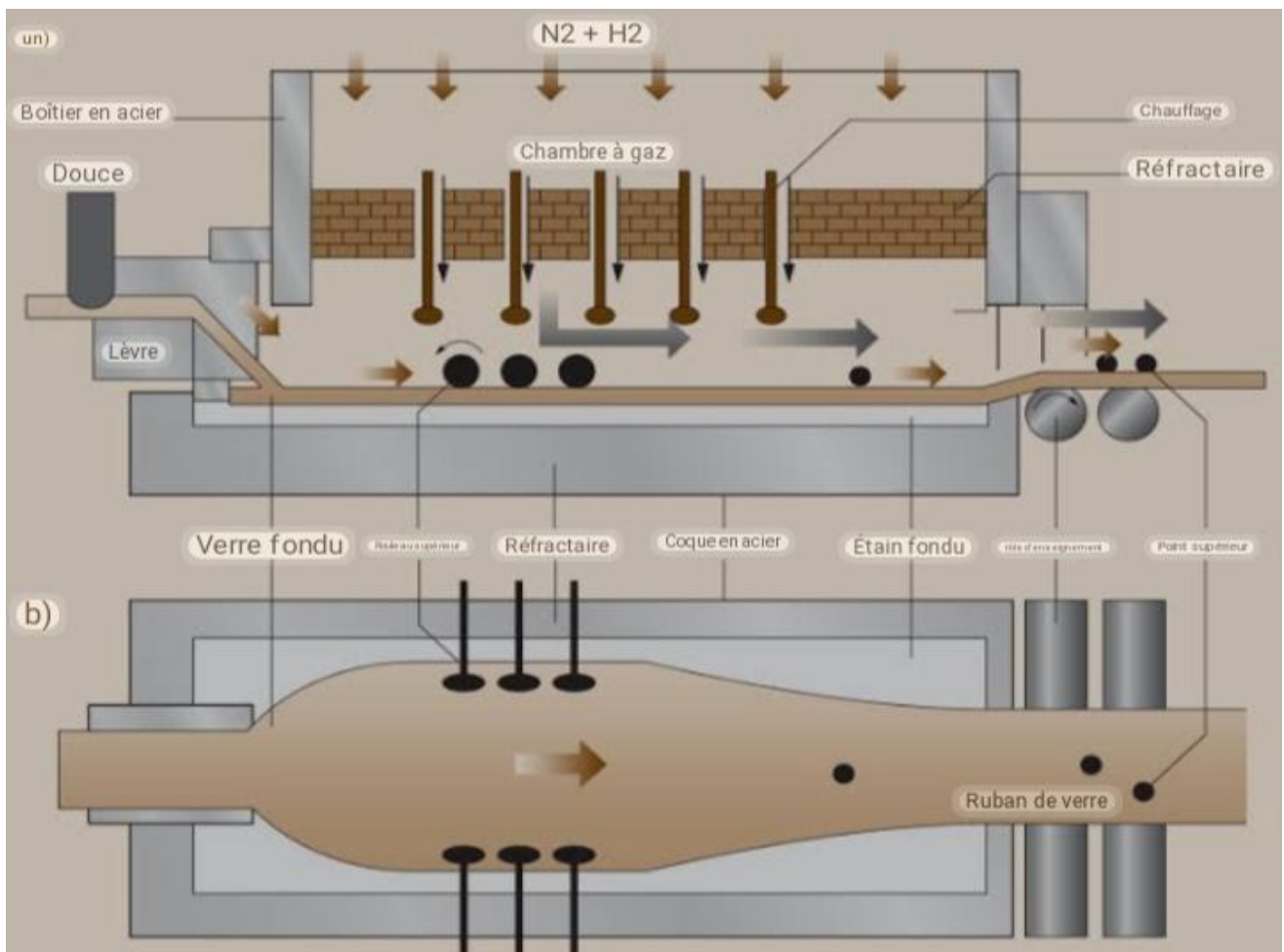


Figure II.10: Schéma montrant le bain d'étain dans la fabrication du verre Float.

❖ **Caractéristiques**

- Longueur totale : 64 m.
- Température du verre à l'entrée : 1100°C.
- Température du verre à la sortie : 600°C.
- Quantité d'étain fondu : 200 tonne [22].

II-2-4-1 Principaux composants du bain d'étain**II-2-4-1-1 Canal d'écoulement**

Le canal est une structure composée de briques en corindon α - β électro fondu. Il doit assurer :

- La connexion avec le four et le bain d'étain doit être compact, afin que le liquide du verre ne puisse pas s'échapper.
- Empêcher l'atmosphère du four de pénétrer dans le bain d'étain et d'affecter la qualité du verre.
- Réduire au minimum l'échappement du gaz protecteur du bain d'étain.
- Contrôler le flux par deux tweels céramiques.
- Stopper la production par un tweel métallique (en cas de problème dans la production) [21].

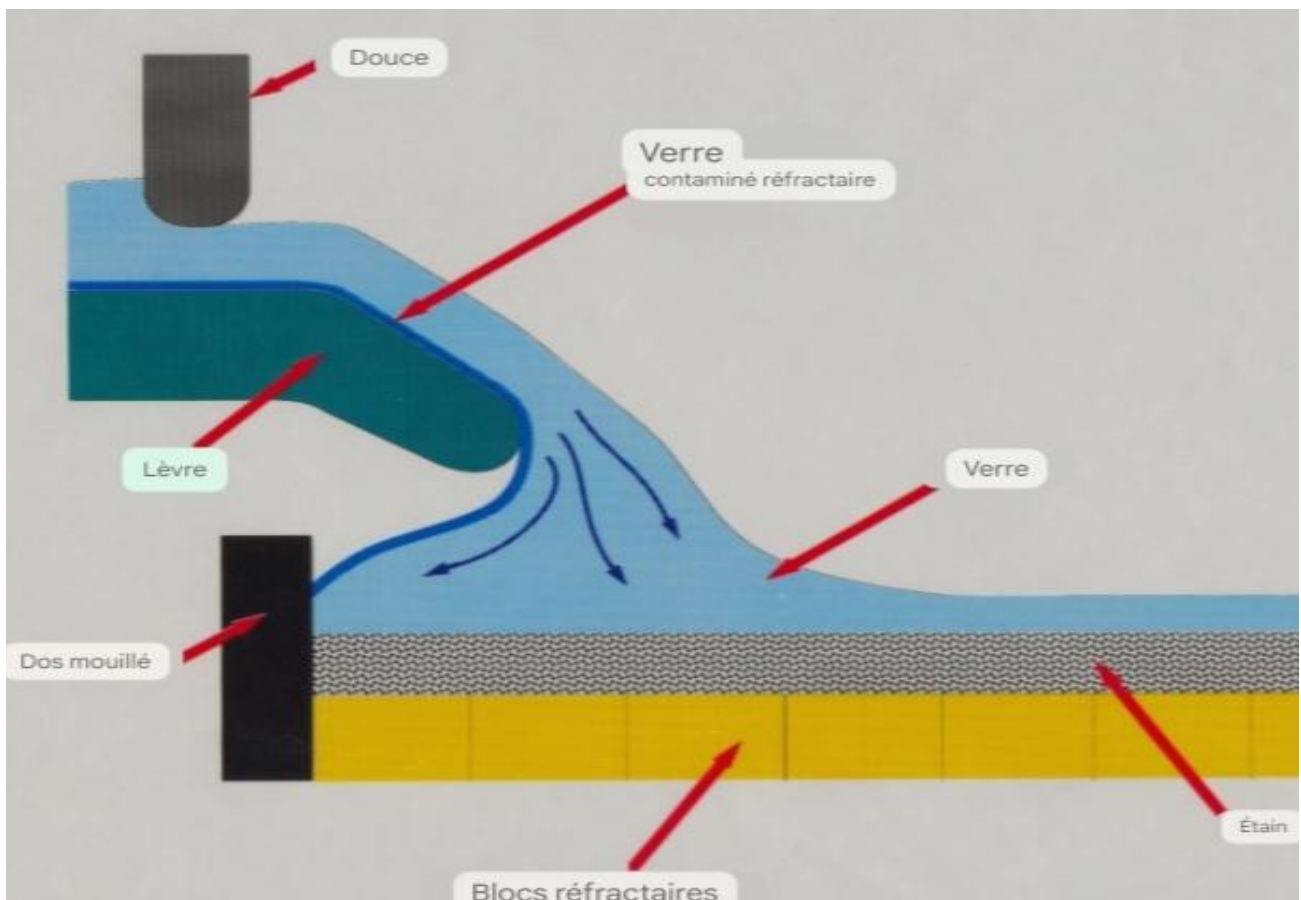


Figure II.11: Schéma montrant le canal.

II-2-4-1-2 Top rollers

Ce sont des roues dentées en acier refroidies à l'eau et animées d'un mouvement de rotation. Elles sont enfoncées dans le verre, près des bords du ruban. Leurs axes de rotation sont horizontaux mais font un angle avec la direction transversale du ruban ce qui tend à produire l'élargissement de la feuille et par conséquent son amincissement. Comme elles ne touchent que la surface supérieure du verre, on les nomme en anglais Top-Rolls mise en œuvre est maintenant bien maîtrisée ; elles sont universellement utilisées, même pour obtenir du verre épais. Pour un débit du verre fixé et une largeur imposée de la feuille, son épaisseur est déterminée par les Top Rolls avec les mouvements suivants :

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

Le processus est contrôlé à distance depuis la salle de contrôle du bain d'étain par des caméras de surveillance et aucune intervention manuelle n'est requise [16].

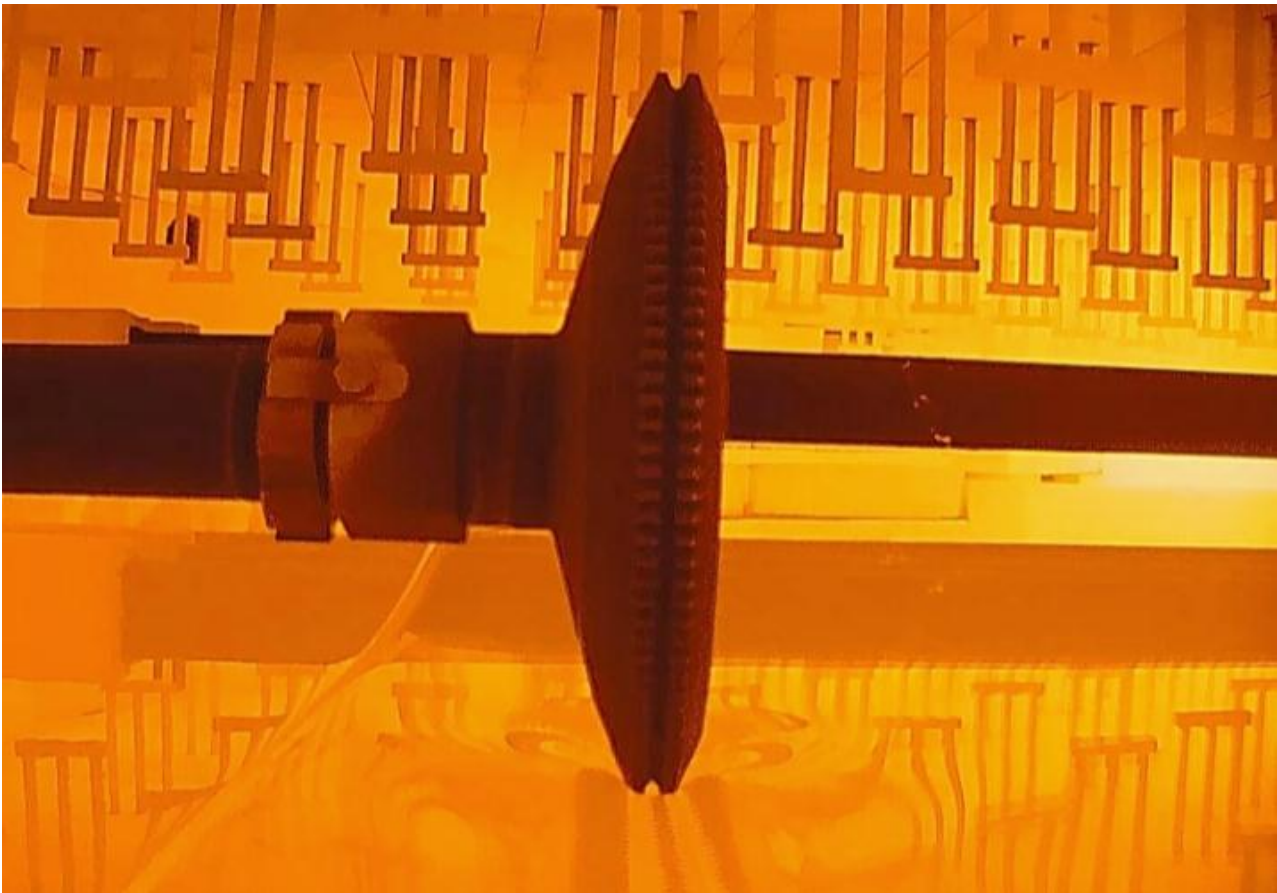


Figure II.12: Photo représentant le top roll au sein du bain d'étain.

II-2-4-1-3 Refroidisseurs

Les refroidisseurs dans le bain d'étain servent principalement à extraire la chaleur du verre dans ce dernier. Cette extraction peut s'effectuer sur la base de deux principes physiques différents: le refroidissement par rayonnement, effectué à l'aide d'éléments de refroidissement situés au-dessus du ruban du verre, et le refroidissement par convection indirecte, réalisée par des refroidisseurs au sein du bain d'étain. Habituellement, ces éléments de refroidissement sont utilisés par paires de part et d'autre du bain d'étain.



Figure II.13: Vue extérieure du refroidisseur au sein du MFG.



Figure II.14: Photo représentant les éléments chauffants au sein du bain d'étain.

II-2-4-1-4 Flags

Ce sont des briques réfractaires en graphite placées sous le ruban de verre sans le toucher. Assure la réduction des flux indésirables d'étain et l'amélioration de la stabilité de la production par une fluidité optimale du ruban de verre. Stopper le courant du verre aussi considéré comme un rôle principal du flag.

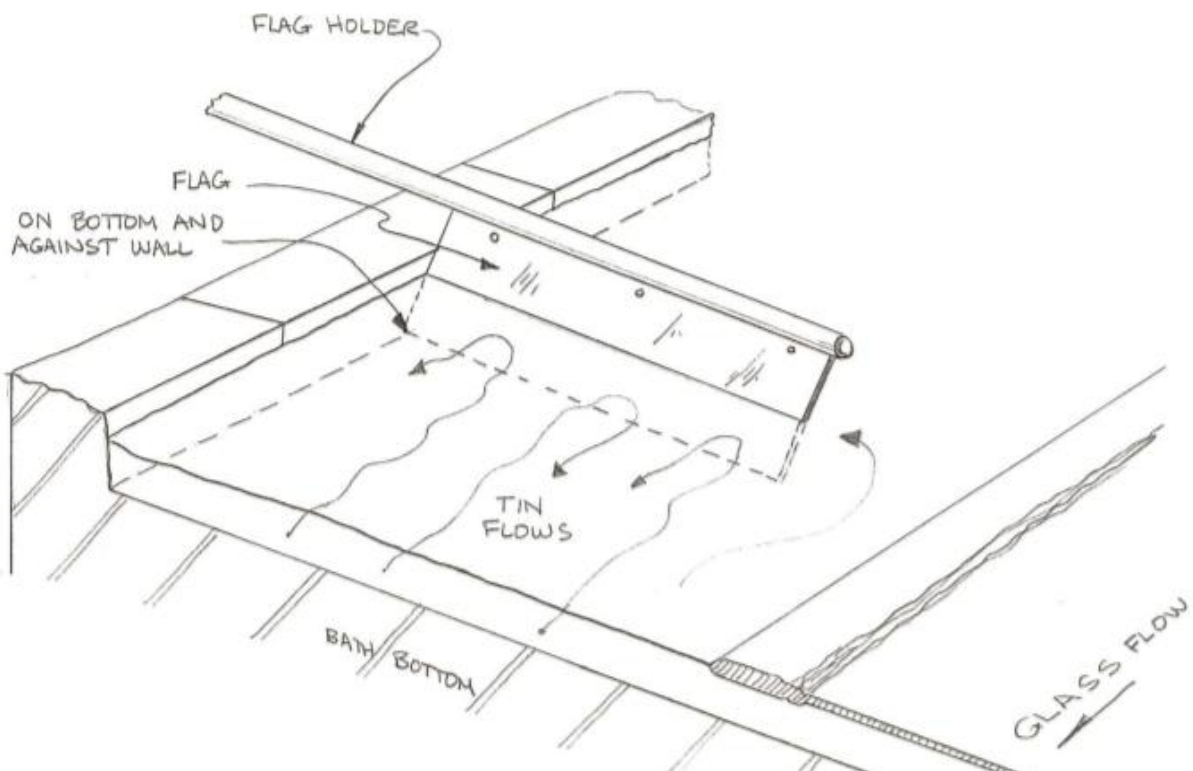
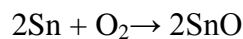
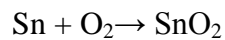


Figure II.15: Schéma montrant la position du flag au sein du bain d'étain.

II-2-4-1-5 Gaz de protection

L'introduction d'un mélange gazeux azote/hydrogène dans le bain d'étain pendant la fabrication du verre plat peut aider à empêcher la formation des défauts dans le verre et à protéger les équipements dans lesquels le verre est mis en forme. Une cuve de flottage consomme en moyenne de 1400 à 1600 m³/h d'azote haute pureté, et de 80 à 130 m³/h d'hydrogène haute pureté pour constituer l'atmosphère réductrice, soit une concentration de 4 à 10%. L'effet de l'entrée du gaz protecteur dans la cuve d'étain empêche l'oxydation de ce dernier, car l'étain est facilement réactif avec l'oxygène à haute température.



C'est pour éviter la contamination que le bain d'étain est chauffé électriquement par des résistances. Donc pas d'introduction de flamme et par conséquent pas d'oxygène. En fonction des exigences de chaque zone de formage du verre, la puissance de chauffage électrique et la zone de contrôle de la température sont raisonnablement disposées le long du bain.

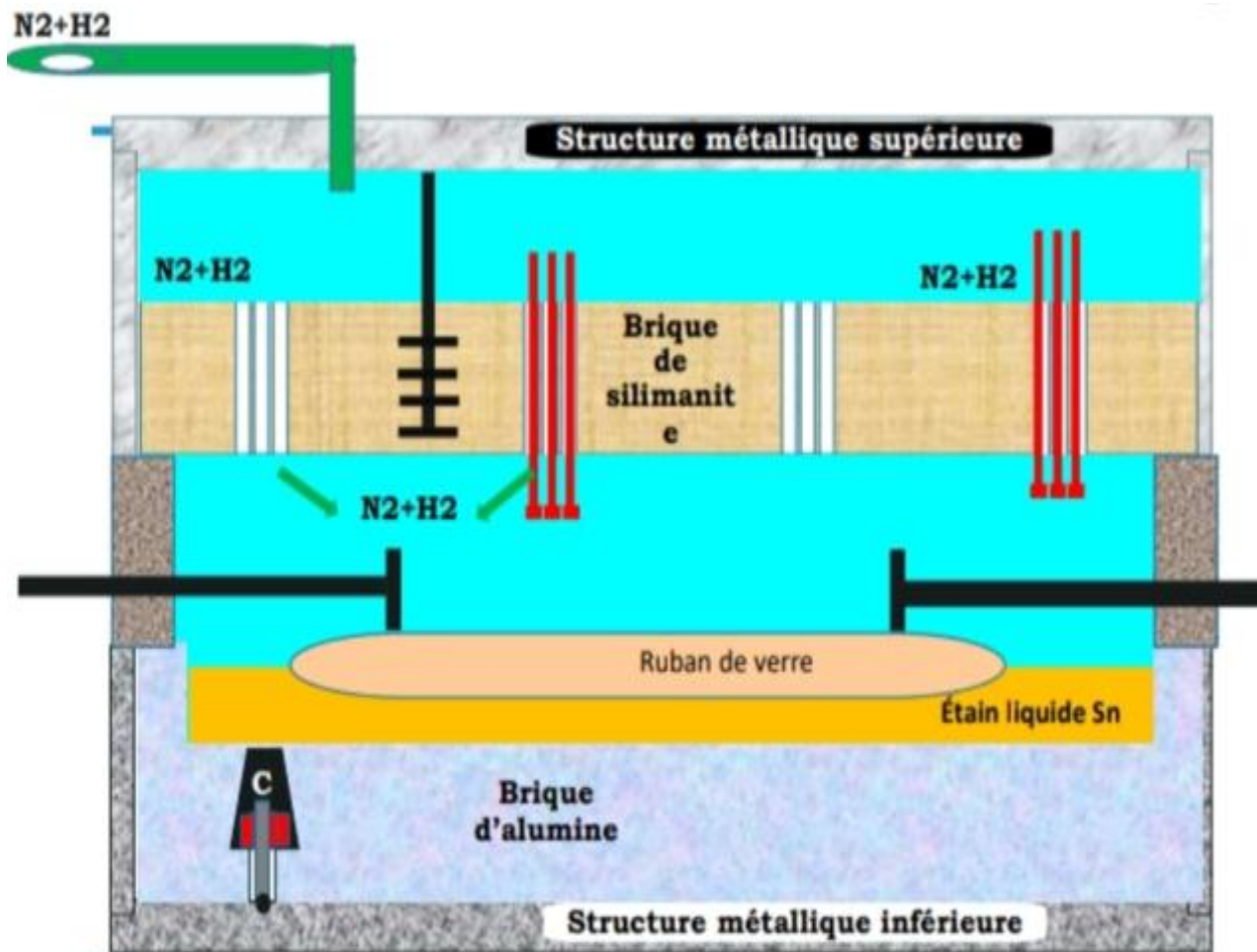


Figure II.16: Schéma montrant l'injection des gaz de protection au sein du bain d'étain [21].

II-2-4-1-6 Dross-Box

La Dross-Box est une zone intermédiaire entre le bain d'étain et l'étenderie ; se situé à l'extrémité du bain d'étain. Le but de la dross-box est d'assurer une étanchéité maximale de la sortie du bain d'étain et également d'empêcher l'air ambiant entre dans ce dernier par l'ouverture du sortie ; cette étanchéité est obtenue grâce à la structure fermée du dross-box et à l'apport d'azote qui est gaz inerte (N_2). Il contient une partie inférieure qui est équipée de trois rouleaux de levage en hauteur pour soulever le verre de la surface d'étain et le tirer dans l'étenderie. La dross-box sera fermée par la partie supérieure qui contient quatre rideaux ; ces rideaux sont des pièces d'équipement essentielles pour contrôler la pression et assurent l'isolation du bain d'étain en arrêtant la pénétration de l'oxygène dans le bain. Ils doivent être entretenus régulièrement et pleinement fonctionnels en tout temps [16].

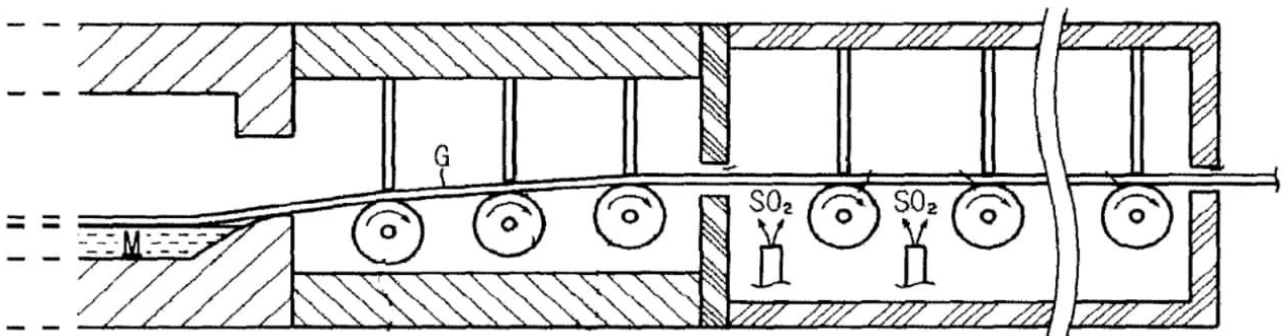


Figure II.17: Schéma montrant Dross-Box.



Figure II.18: Vue extérieure du Dross-Box au sein du MFG.

II-2-5 l'étenderie (recuit)

Afin d'éviter la formation des défauts mécaniques dus aux tensions subies par le verre pendant le refroidissement, le ruban du verre est soumis au processus de recuit. Il s'agit d'un traitement thermique effectué à l'intérieur d'un tunnel long d'environ 150m. 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). L'étenderie est divisée en deux zones, chaque zone est constituée de plusieurs sections :

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

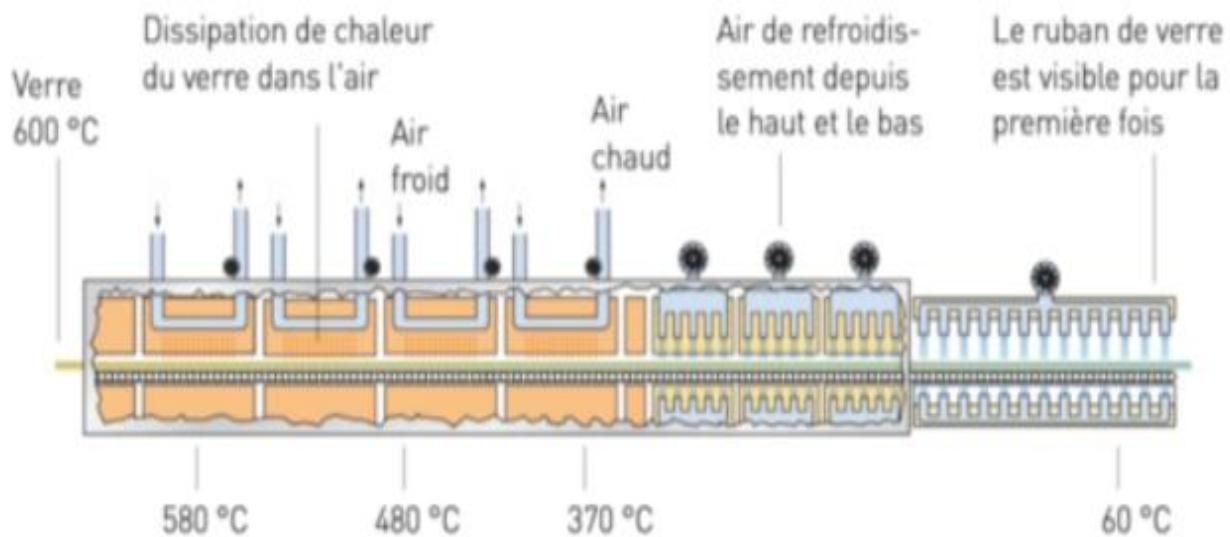
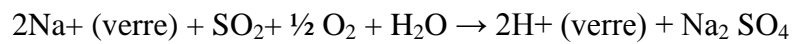


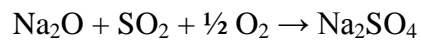
Figure II.19: Schéma montrant L'étenderie.

Le processus thermique de la zone isolante est basé sur le principe du rayonnement thermique. Le refroidissement indirect par rayonnement thermique est obtenu au moyen d'échangeurs de chaleur situés au-dessus et au-dessous de la plaque. L'échangeur de chaleur situé au-dessus de la plaque est constitué de tubes ronds et l'échangeur situé en dessous de la plaque est constitué de tubes rectangulaires. Le processus thermique de la zone de refroidissement est basé sur le principe de la convection forcée. Le refroidissement direct est effectué par de l'air froid soufflé par les buses d'air situées au-dessus et au-dessous de la plaque. Pendant le temps de résidence du verre dans l'étenderie on introduit, afin d'améliorer ses caractéristiques, du SO_2 gazeux. Ce procédé provoque un échange ionique en 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. Ceci crée à la surface du verre une couche appauvrie en sodium et relativement enrichie en SiO_2 et donc plus résistante [21].



Figure II.20: Vue extérieure de l'étenderie au sein de MFG.

II-2-6 Découpe et contrôle qualité

Après le travail dans le bout chaud, on procède au travail au bout froid au niveau de l'atelier de la découpe. C'est une installation longue de 160m et large de 5m. La largeur du ruban de verre peut atteindre 4.5m max (la longueur nette est de 4m). Le ruban se déplace avec une vitesse maximale de 90m/min, il subit une inspection automatique à l'aide des dispositifs spéciale pour :

- La détection des défauts du produit fini.
- La détection des contraintes dans le produit fini.

Des trémies et des broyeurs sont prévus pour le broyage des rebus découpés et la récupération du calcin, ce dernier est acheminé vers le silo de stockage. Il sera réutilisé plus tard dans la composition du mélange vitrifiable.

Avant sa découpe, le ruban de verre est sur un contrôle permanent (épaisseur, qualité optique, défauts, etc.). Pour la vérification de la conformité du verre, de nombreux tests sont faits afin de cerner, classer et dimensionner les défauts. On cite :

- Des tests lumineux : pour évaluer les défauts linéaires et étirés (taches ou rayures occupant une surface ou une longueur importante), le vitrage est observé devant une surface noire mate dans des conditions lumineuses correspondant à une lumière diffuse du jour. Le vitrage contrôlé est installé à la verticale et parallèlement à cette surface noire. Le point d'observation doit se situer à 2m du vitrage et l'axe d'observation doit être perpendiculaire à la surface du vitrage afin de remarquer les défauts dérangeants à l'œil nu.
- Test Zébra: pour déterminer l'angle de déformation optique (la norme internationale est de 45°).
- Pour une vérification approfondie, un exemple 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.

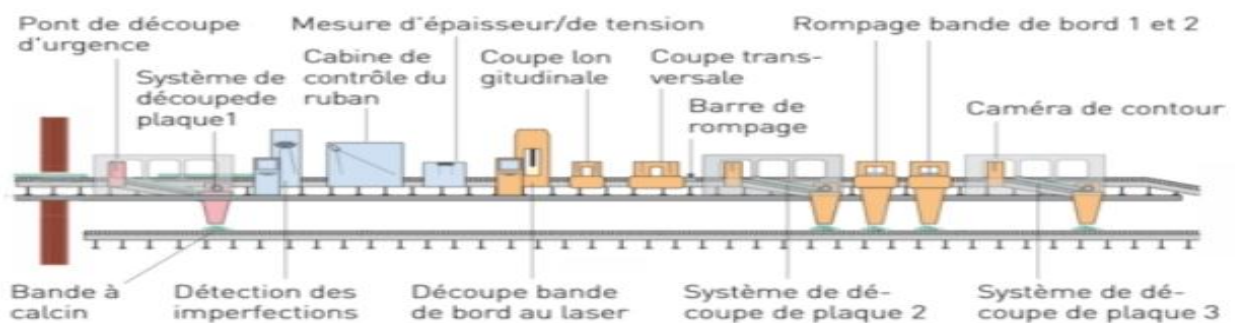


Figure II.21: Schéma montrant le système de la découpe.

II-2-7 Stockage

La phase de stockage est la plus délicate de la « vie » d'un verre float. Les différentes plaques du verre sont séparées à l'aide de poudres intercalaires (ex. leucite) puis emballées et laissées en attente avant la commercialisation. Dans la majorité des cas les magasins ne sont pas pourvus d'un système de contrôle de la température et de l'humidité relative.

Ainsi les verres sont soumis à des cycles de condensation évaporation qui provoquent une détérioration des deux plaques adjacentes sur les hydroxydes formés à partir de Na^+ et Ca^{+2}). Parfois l'altération est très importante car le rapport surface de verre/solution altérante est élevée des piqûres se forment[10] .



Figure II.22: Photo montrant le stockage du verre au sein de MFG.

Conclusion

Le processus de fabrication du verre Float est une révolution qui a transformé l'industrie du verre. En combinant la fusion du sable, de la soude et de la chaux à des températures extrêmement élevées, suivi par un refroidissement contrôlé sur un bain d'étain fondu, ce procédé permet d'obtenir des rubans de verre d'une qualité exceptionnelle et d'une planéité parfaite.

Le verre Float représente une avancée majeure dans la fabrication du verre, offrant des possibilités infinies en termes de design et d'innovation. Son processus de production sophistiquée et ses propriétés uniques en font un matériau incontournable dans le domaine de l'architecture et la construction moderne.



Identification

et élimination

des défauts

de fusion

Introduction

Nous explorerons dans ce chapitre l'impact des paramètres du four de fusion notamment le four à régénération sur la fabrication du verre et les briques réfractaires utilisées. Ensuite, nous analyserons les défauts du verre qui peuvent survenir pendant la processus de fusion, en examinant leur classifications, leur aspects extérieur, leur microstructures, leurs causes potentielles et les mesures correctives à mettre en place pour chaque type de défaut. Cette étude approfondie permettra de comprendre comment optimiser la production du verre en identifiant, classifiant et traitant efficacement les défauts rencontrés.

III-1 Paramètres du four de fusion (dans l'industrie MFG)

III-1-1 Flamme

La luminosité de la flamme doit être légèrement **sombre pas trop brillante**, ne comporte **pas de fumée**.

On peut classer le type, la longueur et l'angle de la flamme par ordre sur chaque deux port comme suit :

1) Port 1 —→ 2

- Type de la flamme est réductrice pour éviter la combustion précoce du charbon.
- Longueur de la flamme est de 60% à 65% la largeur du four.
- Les angles des injecteurs sont un peu élevés, sans toucher le lot de la matière première. Dispersion de la matière qui peut bloquer les injecteurs (endommagement et explosion).

2) Port 3 —→ 4

- Type de la flamme est neutre sinon la mousse compacte entravera l'affinage.
- Longueur de la flamme est de 80% à 85% la largeur du four.
- L'angle de la flamme bas, sans toucher le verre (éviter le défaut de type bulle d'air).

3) Port 5 —→ 6 ou plus

- Type de la flamme est oxydante pour transformer entièrement le SO_2 en SO_3 .
- Longueur de la flamme est de 60% à 65% la largeur du four.
- L'angle de la flamme bas, sans toucher le verre (éviter le défaut de type bulle d'air).

Chapitre III Identification et élimination des défauts de fusion

III-1-2 Pression

La pression dans l'enceinte d'un four est de l'ordre de quelques dizaines de pascals. C'est un paramètre d'exploitation très important qu'il faut suivre avec attention. En effet, un mauvais contrôle de la pression peut entraîner :

- Augmentation de la consommation spécifique et diminution du rendement.
- Détérioration de la combustion.
- Dégradation des parois en cas d'excès de pression.

❖ Causes d'une surpression dans le four

- Mauvaise circulation des fumées.
- Panne de registre principal.
- L'effondrement des briques d'empilage (plus grave).

❖ Impacts d'une surpression

- Accélération détérioration des réfractaires.
- Mauvais dégagement de SO_3 et création de petites bulles.
- Flamme turbulent dans le four.
- Diminution de la teneur en O_2 , combustion incomplète et une flamme courte.

❖ Causes de la dépression du four

La principale cause de la dépression est que la force d'aspiration est trop importante.

❖ Impacts d'une dépression

- Baisse de la température avec la même consommation de carburant.
- Perturbation des flammes.
- Perturbation de la courbe de feu.

Remarque : une corrélation directe entre la flamme et la pression est que la flamme est longue ; la pression est bonne dans le four.

III-1-3 Courants convectifs

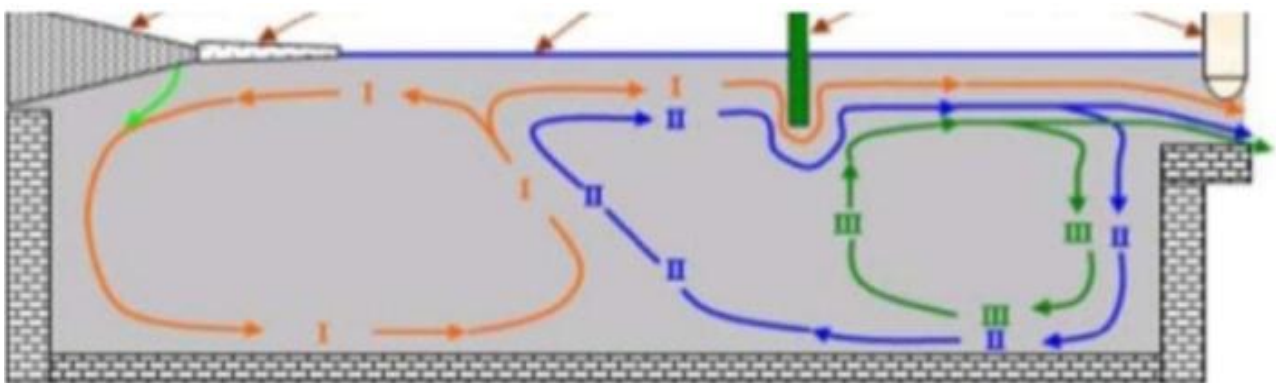


Figure III.1: Schéma représentatif des courants convectifs du verre dans le four de fusion.

Chapitre III Identification et élimination des défauts de fusion

1ère couche: verre liquide fraîchement fondu, homogénéisé une seule fois, il est donc de meilleure qualité.

2ème couche: verre liquide de la zone d'affinage recyclé, homogénéisé au moins deux fois, sa qualité est toujours meilleure.

3ème couche: verre liquide de la zone de conditionnement, recyclé plusieurs fois. Durée de séjour à l'intérieur du four plus grande. Qualité moindre par rapport aux autres couches.

❖ Déplacement des courants influe sur l'ascension des bulles d'air et peut conduire à un mauvais affinage.

III-1-4 Niveau du verre

Le principe de contrôle de niveau du verre doit se faire en mode automatique et basé sur l'atténuation de rayonnement gamma lors de sa pénétration dans la matière pour minimiser la fluctuation du niveau. Cette dernière provoque la corrosion des briques de parois qui en s'introduisant dans le verre liquide, il y a apparition de défauts et les causes de cette fluctuation sont comme suit :

- Arrêt de défaut sur l'une des enfourneuses (colmatage, ouverture de registre, vitesse de rotation).
- Fluctuation de tirage (formage).
- Défaut de système de commande automatique de niveau liquide [21].

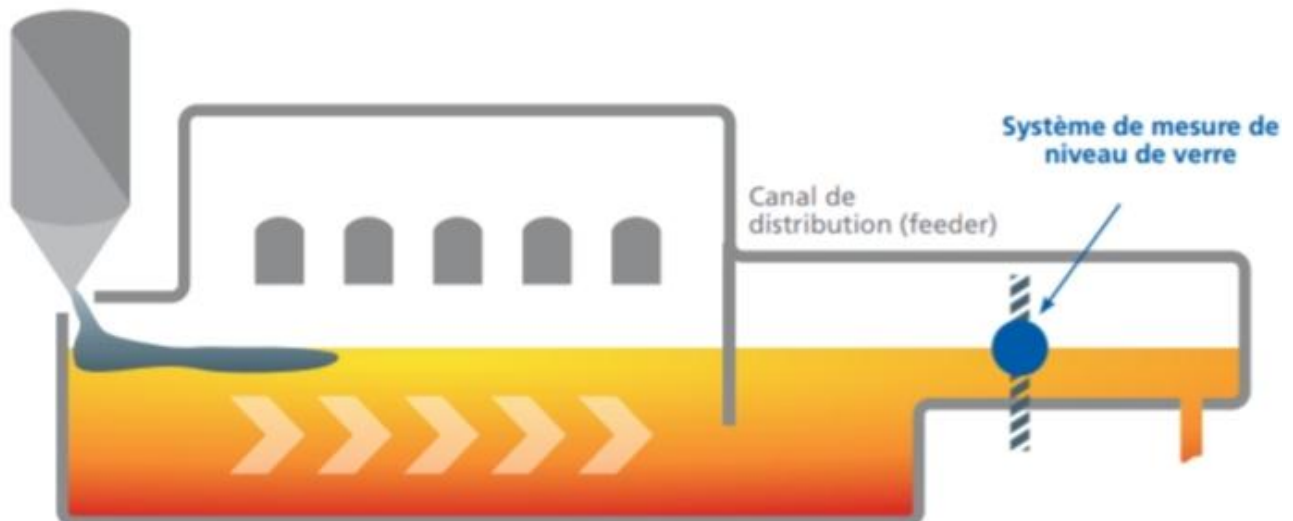


Figure III.2: Schéma représentatif le système de mesure de niveau du verre.

Chapitre III Identification et élimination des défauts de fusion

III-2 Briques réfractaires électrofondues utilisées dans le four de fusion

Les réfractaires électrofondues à base de zircone sont essentiellement utilisées dans l'industrie verrière pour fabriquer les parois et le sol de four. Ils se distinguent principalement, quatre familles de matériaux : (AZS) les Alumines – les Zircons – Silice, (THTZ) les Très Haute Teneur en Zircon. L'intérêt de l'ajout de zircone dans la composition initiale, c'est pour améliorer la résistance à la corrosion au contact du verre. Les développements qui ont suivi, ont permis une grande avancée dans la construction des fours de verrerie, de par l'augmentation de leur durée de vie et la capacité à concevoir des pièces réfractaires de plus grandes dimensions et de formes plus complexes [20].

Les réfractaires électrofondues AZS sont probablement le type de réfractaires plus utilisés dans les parties des fours verriers en contact avec le verre, mais on les trouve aussi dans les superstructures de four. Ils sont plus spécifiquement préconisés en cuve et sol de fusion, affinage, bassin de repos (conditionnement), la gorge...etc., ils peuvent également apparaître dans les zones de contact au cristal au plomb. Au niveau des voutes de fusion et des superstructures de four oxy-gaz, des produits de type AZS à faible quantité de phase vitreuse sont plutôt requis afin de diminuer l'exudation de phase vitreuse. Les produits de type AZS sont élaborés à une température d'environ 1900°C, la cuisson correspond donc au refroidissement de 1900°C à température ambiante. Pour les compositions en THTZ, la température maximale est de 2300°C [23].

Tableau III.1: Tableau représentatif le pourcentage de chaque constituant dans les briques AZS [21].

Désignation	AZS 33#	AZS 36#	AZS 41#
ZrO ₂	>32.5%	>35.5%	>40%
SiO ₂	<17%	<14%	<12%
Al ₂ O ₃	traces	traces	traces
Na ₂ O	<1.4%	<1.2%	<1.1%
Porosité ultrafine	<1.2%	<1.1%	<1%
Zircon incluse	32	35.5	40
Corindon	47	43.5	43

Chapitre III Identification et élimination des défauts de fusion

III-2-1 Zone de fusion

Elle est constituée en brique AZS 41# (avec un pourcentage de zirconium 41%), sur plantée par une voute en brique de silice. Les chambres de régénérations sont reliées au four par les colliers de brûleurs, qui sont conçus d'une couche interne de briques en silice et d'une couche externe de briques en alumine à des briques réfractaire à la silice mais les colliers en AZS 33# pour garder la température et les électrodes dans le sol depuis le port 1 jusqu'à le port 4 en AZS 41#.

III-2 -2 Zone d'affinage

D'une longueur de 16 m, s'étale du dernier port jusqu'à la gorge. La paroi de la zone d'affinage est en brique AZS 36 # (36% de Zr) avec un sol de brique AZS 33# (33% de Zr).

III-2-3 La gorge

Les brique de parois sont en AZS 33# (33% de Zr) avec deux de murs de séparation en silice.

II-2-4 Zone de conditionnement

Dans la zone de conditionnement, la paroi et le sol sont constitués de la même brique réfractaire qui est le corindon (Alumine).

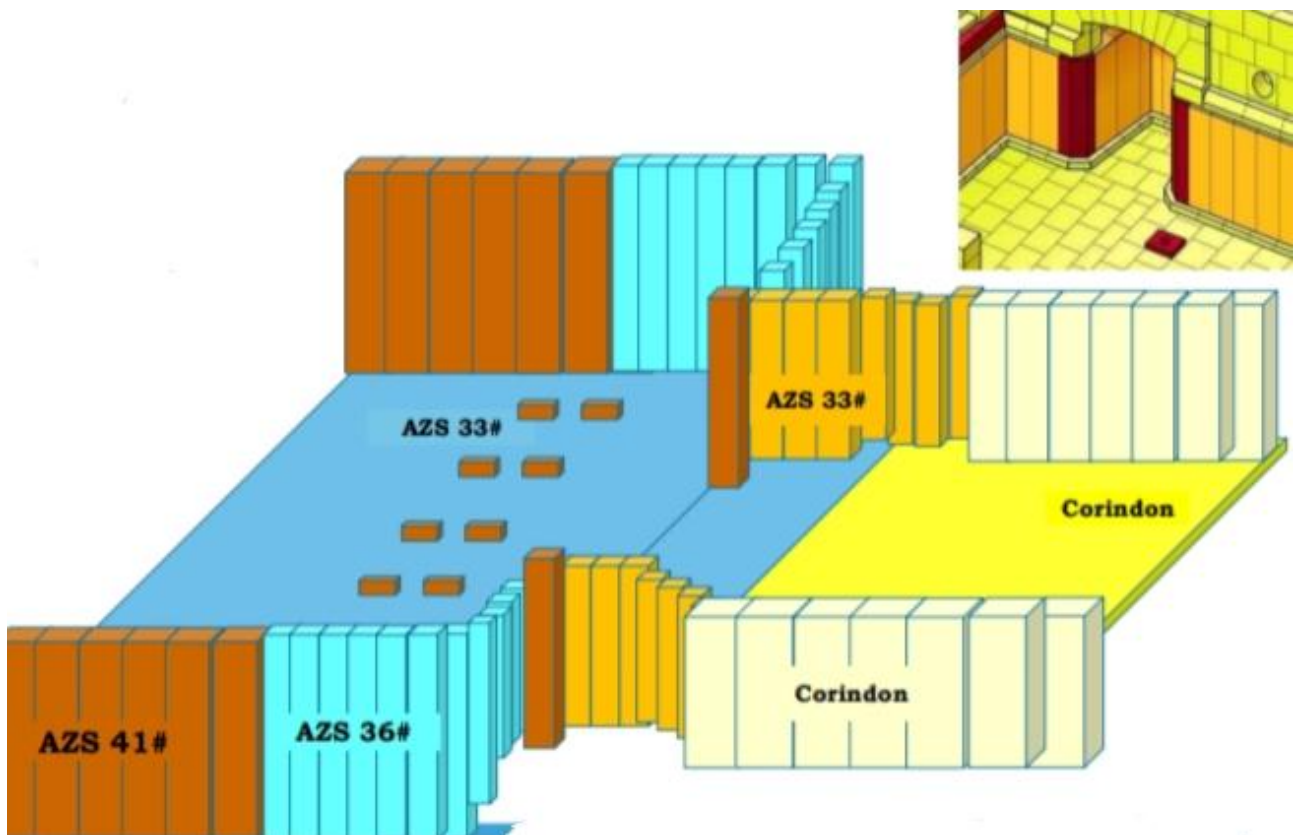


Figure III.3: Les briques réfractaires électrofondues utilisées dans chaque zone de four de fusion [21].

Chapitre III Identification et élimination des défauts de fusion

III-3 Défauts du verre

III-3-1 Définition des défauts du verre

Les défauts dans le verre apparaissent dans le matériau fini (verre) lors de sa fabrication, on peut classer en six grandes catégories suivant la position de formage ; premièrement, des défauts de matière première qui sont entraînés par la qualité de propres matières premières et les impuretés extérieures à cause de raison différentes. Deuxièmement, les défauts de fusion c'est l'ensemble de défauts résultant de mauvaise fusion à la section de four. Troisièmement, les défauts de matériaux réfractaires à cause d'érosion fondue de matériaux réfractaires et d'attaque de matériaux réfractaires d'autre mode. Quatrièmement, les défauts de formage formé à la section de bain d'étain. Cinquièmement, les défauts de recuit résultant de non convenable de régime de recuit ou d'accident au cours de recuit. Sixièmement, les défauts de transformation et de stockage de verre froid résultant au cours de découpage et d'emballage.

III-3-2 Classification des défauts

III-3-2-1 Défauts d'aspect

Un défaut d'aspect est un zone ou la composante haute fréquence de la courbure locale de la surface dépasse un certain seuil. Il altère la qualité d'aspect du verre et inclue les défauts ponctuels et les défauts linéaires et étendus [24] .

III-3-2-1-1 Défauts ponctuels

Un défaut ponctuel entraîne un défaut autour d'un point, ils peuvent être des inclusions présentent à l'intérieur du verre qui sont: bulle d'air, pierre, taches.

- **Bulles d'air**

La bulle d'air est un état de gaz qui peut voir dans le verre. Par rapport à corps fondu du verre, elle est un autre état de la matière et aussi un défaut d'indentification et de résolution plus difficile dans le verre flottant. Son existence est gravement l'influence sur l'amélioration de qualité du verre. Elle présente toujours un aspect brillant et de forme elliptique. Le terme « puce » désigne les bulles dont la dimension est inférieure à 5,5 mm et le terme « bouillons » dont la dimension supérieur à 6 mm. On peut classer les bulles d'air en quatre types : bulles de décantation, bulles de reébullition, bulle de soude de sulfate et bulle des impuretés.

Chapitre III Identification et élimination des défauts de fusion

- **Pierres**

La pierre du verre est un défaut grave et aussi une inclusion transparente en forme différente. Pour sa forme, il ne peut distinguer les pierres en forme différente et connaître la raison produite que sous l'analyse visuelle au moyen de microscope. Ce genre de défaut se trouve toujours dans l'épaisseur du verre mais si ce défaut est causé de liquide d'égoutture au toit de voûte de la section de refroidissement ou du bain d'étain, il pourra se présenter légèrement sur la surface du verre. La dimension de pierre peut être vue par les yeux, il y a de trop petit grain de grosse inclusion de forme et de couleur différentes, ils sont peut-être non transparents ou translucides. Du fait que sa composition est différente que celle du verre autour. Par conséquent, sa dilatation sera effectuée généralement selon sa composition, c'est ainsi qu'il pourra se produire la tension à son autour lors de refroidissement, particulièrement en cas de pierre plus grosse, la tension est plus grande. En tout cas, cela entrainera de la rupture de ruban du verre.

Catégorie de pierre peut être partagée: pierre de matériaux réfractaires, pierre de charges vitrifiables, pierre d'égoutture de voûte et pierre de cristal de dissection [25].

- **Tâches**

Les tâches sur le verre sont considérées comme de défauts dans la fabrication du verre, pouvant compromettre la qualité du produit final. Ces tâches peuvent être causées par divers facteurs tels que les impuretés, des problèmes de fusion ou des conditions de traitement inadéquates. En général, les tâches sur le verre peuvent affecter son apparence, sa transparence, et même sa fonctionnalité, ce qui en fait un défaut indésirable dans les processus de fabrication du verre.

III-3-2-1-2 Défauts linéaires ou étendus

Les défauts linéaires ou étendus dans la fabrication du verre sont des défauts qui s'étendent sur une longueur significative, tel que les rayures qu'elles sont causées par des instruments tranchants ou rugueux. Le type de rayures sur le verre est aléatoire et en forme de chaîne qui se produit lors de polissage.

III-3-2-2 Défauts optiques

Ce sont des imperfections qui affectent les propriétés optiques du verre, telles que la transmission de la lumière, la réfraction et la réflexion. Ils peuvent affecter la qualité visuelle et fonctionnelle du verre. Une déformation optique causée par des inhomogénéités ou des inclusions dans le matériau, des problèmes de fabrication ou des dommages subis pendant le traitement ou l'utilisation.

III-4 Défauts du verre courant de four de fusion

Les défauts du verre se produisent sous de nombreuses formes différentes tandis que les sources de défauts présentent une diversité considérable. Par exemple, deux défauts peuvent avoir la même structure et le même caractère, mais une origine qui provient de sources différentes et conduite par des mécanismes différentes. Le technicien en verre qui étudie les défauts du verre devrait être en mesure d'apprécier ces différences visant un dépannage réussi. Les réfractaires utilisés sont la source la plus fréquente de pierres. Ils affectent les propriétés minéralogiques et les conditions de formation.

Lorsque nous nous concentrons sur la silice, il existe différents types de défauts de silice. Il est difficile de décrire la source parce que c'est la principale matière première utilisée et en plus d'une grande quantité de réfractaire de silice sont introduits dans les fours de fusion. Une observation micro-analytique est nécessaire pour définir la source. L'égouttement de silice est un défaut très commun du verre flotté qui est sous forme de trydimite. Gel de silice ou l'échelle de trydimite vient également comme défaut de la production de flotteur. La couronne ou les réfractaires de silice de superstructure dans le fondoir sont affecté par la vapeur alcaline. Cette phase eutectique formé fond et recristallise sur la surface réfractaire. Ces petits cristaux tombent dans le verre lorsque l'atmosphère ou la température de four fluctue. Les producteurs du verre utilisent des « brûlures de gel » dans la zone d'affinage pour diluer l'atmosphère alcaline et empêcher la vapeur alcaline d'attaquer les réfractaires de silice [26].

III-4-1 Défauts « Bulles d'air »

III-4-1-1 Bulle de décantation

III-4-1-1-1 Aspect extérieur

La bulle est répartie d'une manière homogène sur la plaque du verre, le diamètre de la bulle est de 0.1mm à 1mm ; la petite bulle est en rond (en rond pour la plaque épais), et la grande bulle est en ellipse (en ellipse pour la plaque mince), elle est répartie dans la plaque du verre pour la plupart.

III-4-1-1-2 Microstructure

La bulle est vide. La composition principale dans la bulle d'air est de N_2 et CO_2 .

III-4-1-1-3 Raison possible

- Insuffisant de l'agent de décantation (agent affinant qui est le sulfate de soude) et la production de mauvaise décantation (affinage).
- Atmosphère de point chaud est plus oxydée de manière que SO_3 ne peut pas évacuer et ne peut pas mettre en valeur de l'agent de décantation (affinant).

Chapitre III Identification et élimination des défauts de fusion

- Suppression de la partie de refroidissement résultant de la fluctuation de pression du four, le gaz SO_3 ne peut pas évacuer.
- Une dernière paire de brûleur du four de fusion est en atmosphère réductrice forcée.
- Déplacement arrière de limite de bulle résultant de mauvaise fusion, la zone de décantation (de port 4 jusqu'à la fin de la zone d'affinage) est plus courte.
- Température de décantation est plus basse.

III-4-1-1-4 Des mesures à prendre

- Régler la teneur en sulfate de soude selon la quantité résiduelle de SO_3 .
- Régler l'atmosphère neutre de flamme de brûleur de point chaud à l'atmosphère réductrice.
- Régler l'atmosphère de flamme d'une dernière paire de brûleur en atmosphère oxydante ou en atmosphère neutre minimum.
- Régler la position de limite de bulle et assurer la longueur de zone de décantation.
- Maintenir la température convenable.

III-4-1-2 Bulle résultant de matériaux réfractaires

III-4-1-2-1 Aspect extérieur

Du fait que la position de la bulle est compliquée, la dimension, la forme et la position dans la plaque du verre n'ont pas régularité. En général, la bulle est plus grande à cause de substance réductrice dans des matériaux réfractaires, le diamètre de la bulle d'air formée par le gaz qui évacue de microporosité des matériaux réfractaires est différent.

III-4-1-2-2 Microstructure

Si la bulle formée par le charbon dans des matériaux réfractaires, la paroi de bulle a un petit peu de trace de soufre libéré, Si la bulle formé par l'évacuation de trous des matériaux réfractaires, la composition de gaz dans la bulle est proche de la composition d'air.

III-4-1-2-3 Raison possible

- Du fait la méthode différente de fabrication pour quelques matériaux réfractaires introduit une partie de charbons, ces charbons se formeront la bulle de CO_2 avec l'oxygène dissous dans le verre après la touche de liquide de verre ou la bulle de CO_2 de libération avec la réaction d'oxydation réductrice de SO dissous dans la liquide du verre.
- Les matériaux réfractaires auront des porosités certaines au cours de l'usinage et s'infiltreront le gaz dans la surface de la liquide du verre et au cours de l'attaque de la liquide du verre se formeront la bulle d'air.

Chapitre III Identification et élimination des défauts de fusion

III-4-1-2-4 Des mesures à prendre

- Choisir les matériaux réfractaires de bonne qualité et réduire les porosités de ces matériaux.
- Réduire la teneur en charbon dans des matériaux réfractaires qui touchés le verre.
- Abaisser la température de réaction et empêcher la réaction chimique entre le verre et les matériaux réfractaires.
- Diminuer la fluctuation de reflux et la surface de liquide du verre.

III-4-1-3 Bulle formée par la fluctuation de surface de liquide du verre

III-4-1-3-1 Aspect extérieur

Cette bulle n'a pas la régularité, on peut la voir sur toute la plaque du verre, le diamètre de bulle est plus petite.

III-4-1-3-2 Microstructure

La bulle résultant de matériaux réfractaire à cause de la fluctuation de surface de liquide a des traces de soufre libéré.

III-4-1-3-3 Raison possible

- La bulle résultant de la réaction entre le liquide du verre et les matériaux réfractaires est ramenée aux verres à cause de la fluctuation de surface de liquide.
- La bulle formée par la mauvaise fusion.
- La fluctuation de surface de liquide fait varier l'écoulement du verre, et SO_3 dissous dans le liquide du verre ne peut pas évacuer.

III-4-1-3-4 Des mesures à prendre

- Stabiliser le système de commande automatique de surface/niveau du verre et assurer l'enfournement régulier de l'enfourneuse.
- Augmenter le débit d'air de paroi du four et refroidir les matériaux réfractaires.
- Stabiliser la pression du four et élever la température de fusion.

III-4-1-4 Bulle d'agitation

III-4-1-4-1 Aspect extérieur

Le diamètre de la bulle est plus grande, généralement plus de 1mm, elle se trouve sur la surface supérieure de la plaque du verre, il y a de moirage autour de bulle d'air, la position de bulle d'air est fondamentalement stable.

III-4-1-4-2 Microstructure

La bulle est vide sous le micromètre, la composition de gaz dans la bulle est proche de la composition d'air.

Chapitre III Identification et élimination des défauts de fusion

III-4-1-4-3 Raison possible

- Profondeur de pénétration de malaxeur d'agitation dans le liquide du verre est trop peu profonde de manière d'apporter l'air dans le liquide du verre.
- Vitesse de rotation de malaxeur d'agitation est trop rapide de manière d'apporter l'air dans le liquide du verre.

III-4-1-4-4 Des mesures à prendre

- Régler la profondeur de pénétration de malaxeur d'agitation dans le liquide du verre et choisir la vitesse de rotation convenable.
- Diminuer la vitesse de rotation d'agitation à condition préalable de ne pas gêner la qualité de surface du verre (déformation optique).
- Régler le courant laminaire de reflux de liquide du verre afin d'adapter à la vitesse de rotation d'agitation.

III-4-1-5 Bulle formée par air de dilution

III-4-1-5-1 Aspect extérieur

Le diamètre de bulle est plus grand, la bulle ouverte pour la plupart, elle se trouve sur la surface supérieure de la plaque du verre. La position de la bulle d'air n'est pas stable.

III-4-1-5-2 Microstructure

Du fait que cette bulle est causée par les impuretés pour la plupart, il y a des impuretés sur la paroi de bulle. La teneur en CO₂ dans la composition de gaz est plus haute.

III-4-1-5-3 Raison possible

- L'air de dilution n'est pas propre, la réaction entre les poussières et l'O₂ dans le liquide du verre se produit le CO₂ et se forme la bulle d'air.
- Les impuretés dans l'air de dilution tombent dans le liquide du verre et se forment la bulle ouverte d'air.

III-4-1-5-4 Des mesures à prendre

- Remplacer régulièrement la toile de filtration de l'air de dilution et assurer la fourniture de source propre d'air.
- Réduire la quantité d'utilisation d'air de dilution.
- Prévenir la vibration de ventilateur d'air de dilution.
- Concevoir l'ouverture de soufflage et l'angle convenable d'air de dilution.

III-4-1-6 Bulle de rébullition

Cette bulle résultant de raison physique (rébullition thermique et mécanique) et chimique (variation de degré de dissolution de gaz), est la bulle formée à cause de relibération de gaz dissout dans le verre fondu.

Chapitre III Identification et élimination des défauts de fusion

III-4-1-7 Bulle de soude de sulfate

La bulle de soude de sulfate est généralement la longue forme, il y a des impuretés de gaz avec dépôts brillants de soude de sulfate à l'intérieur. Dans le mince verre, ce défaut se présente comme un trait brillant. Ce bulle est en forme de noyau de jujube pour la plupart, remplie le cristal blanc là-dedans, sur la surface de ruban du verre, il y a des moirages autour de bulle. Quelques bulles sont en forme de granulométrie irrégulier et flottent sur la surface du verre, en blanc ou en blanc comme lait, il y a des moirages autour de granulométrie.

III-4-1-8 Bulle d'impureté

Du fait que la position de ce bulle est plus compliquée, le grandeur, la forme et la position dans le ruban du verre n'ont pas de régularité. En générale ; la position de ce bulle est plus arrière, sa diamètre est plus grande et sa régularité est petit à petit fort.

III-4-2 Défauts « Pierres »

III-4-2-1 Pierre de Quartz

III-4-2-1-1 Aspect extérieur

La surface de la plupart de ruban du verre est en forme petit grain blanc ou en corps polymérisé avec plusieurs grains. Il y a de couche de diffusion plus large autour de pierre, les pierres restées dans le four plus longtemps, la surface est céramique, le périmètre et la limite de verre n'est pas trop clair.

III-4-2-1-2 Microstructure

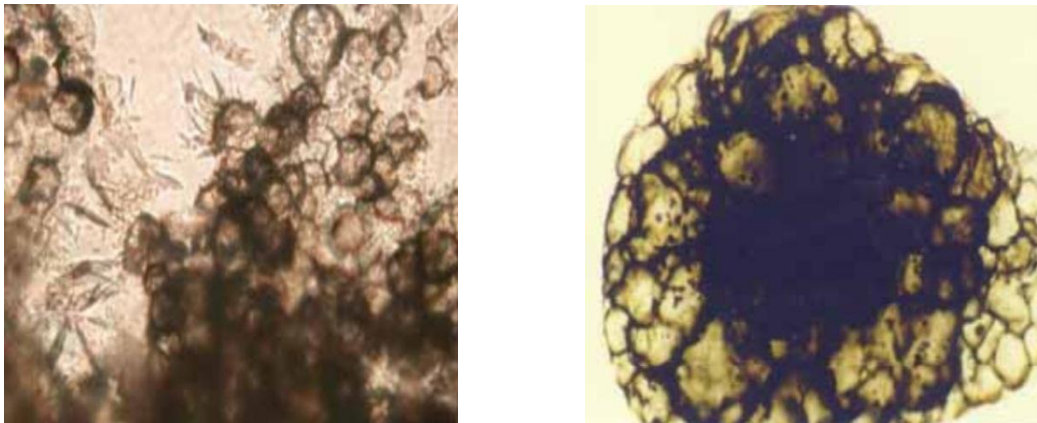


Figure III.4: Quartz non fondu.

III-4-2-1-3 Raison possible

- Plus grand le grain de sable siliceux cause la formation de quartz non fusion.
- Hétérogène de charges vitrifiables ; formation de quartz non fusion à cause de l'enrichissement local de sable siliceux.
- Séparation de couche au cours de transport et de stockage dans le silo de tête du four de charges vitrifiables.

Chapitre III Identification et élimination des défauts de fusion

- Plus de poudre fin de sable siliceux; formation de boule de matériaux.
- Moins d'agent affinant Na_2CO_3 et Na_2SO_4 .
- Sortie de matériaux ou coupure de matériaux au bord.
- Plus basse la température de fusion (température de verre fondu).

III-4-2-1-4 Des mesures à prendre

- Il faut strictement contrôler la granulométrie supérieure et inférieure de sable siliceux, dans le cas de fonctionnement régulier de malaxeur (si le malaxeur est en panne, il peut éliminer l'autre raison possible suivante).
- Donner les paramètres raisonnables de mélange par la détection et l'essai de l'homogénéité de charges vitrifiables afin d'assurer la bonne homogénéité de charges vitrifiables.
- Consolider la fusion de zone avant (le premier et le deuxième port) de régler la charge de chaleur après établir la courbe de la température et augmenter la température du verre fondu.

III-4-2-2 Pierre de Zircon

III-4-2-2-1 Aspect extérieur

Le zircon incliné se divise en zircon incliné primaire et zircon incliné secondaire et zircon incliné mixte primaire et secondaire, l'aspect extérieur de trois catégories de zircon incliné n'est pas un grand différent. Ils sont clair et se présentent comme le petit grain plus densité en blanc et en gris dans le ruban du verre.

III-4-2-2-2 Microstructure

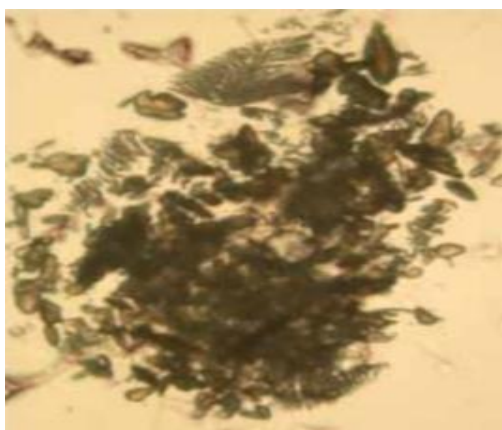


Figure III.5: Zircon incliné primaire en œuf .

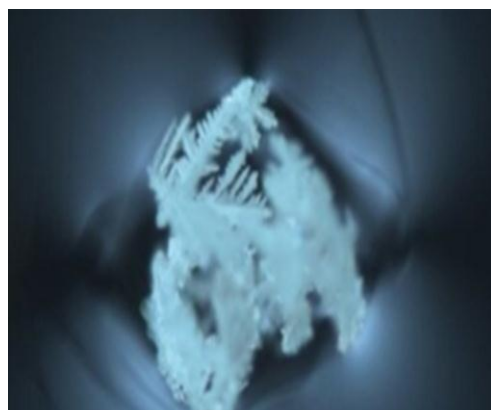


Figure III.6: Zircon incliné primaire en grain.

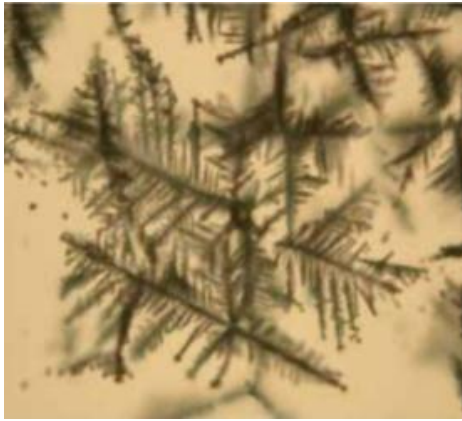


Figure III.7: Zircon incliné
Secondaire.

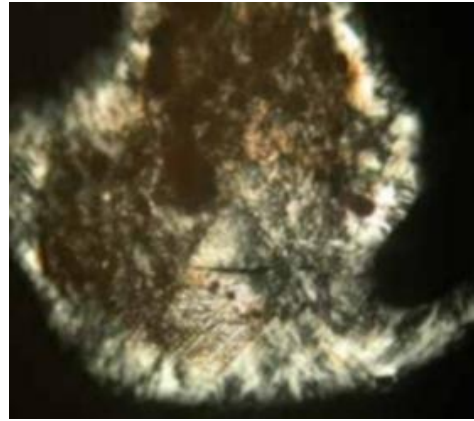


Figure III.8: Zircon incliné
En grain + cavolinite.

III-4-2-2-3 Raison possible

- Formation à cause de brique AZS de paroi du bain. Sous l'attaque du verre fondu, la surface de brique AZS s'est écaillée et se produire le défaut de zircon incliné primaire et secondaire.
- Descente de pisé de quartz au zirconium dans le verre fondu; Le pisé de quartz au zirconium séparera entre le mur de corindon au zirconium du four de fusion et le grand voûte de brique de silice au début de l'attrempage, le sous-fritte de pisé de quartz au zirconium, il ne tombera pas dans le verre fondu et formera le zircon incliné sous l'érosion de flamme et le vibration. La structure de la pierre formée par le pisé de quartz au zirconium est plus souple.
- Inclusion de matériaux réfractaires au zirconium introduit par les matériaux bruts et le calcin.
- Substance tourbillonné de couche stable au fond du four; En cas de grande variation de température au fond du bain du verre, il pourra se produire "le mortier tourbillonné" afin d'entraîner le zircon incliné déposé au fond du four, la croissance de cette sorte de cristal est toujours bien et complète, ils sont le zircon incliné secondaire pour la plupart.

III-4-2-2-4 Des mesures à prendre

- Eliminer le grain de cette sorte de pierre dans le verre brute, parce que cette sorte de pierre entrera de nouveau dans le four avec le calcin, la grande pierre est plus difficile à foudre et la petite pierre continue de fondre en trait ou moirage.
- Renforcer la protection de paroi du bain et augmenter l'air de refroidissement ou installer le refroidisseur à eau.
- Contrôler l'angle et la longueur de flamme pour éviter que le pisé de quartz au zirconium descende dans le verre fondu.

Chapitre III Identification et élimination des défauts de fusion

- Il faut vérifier strictement toutes les sortes de matières premières entrées en usine et dans le four, il est interdit que les impuretés au zirconium entrent dans le four.
- Renforcer l'opération de fusion et stabiliser le reflux de liquide du verre et éviter de tourbillonner le liquide du verre froid au fond du four.



Figure III.9 : Erosion de brique AZS.

III-4-2-3 Pierre de Corindon

III-4-2-3-1 Aspect extérieur

Le corindon est en forme grain densité en blanc sur la surface de ruban du verre; le grain est plus petit, la pierre est plus claire.

III-4-2-3-2 Microstructure

Le centre de pierre est en structure de briques rondes densité, il y a de forme de grain à côté de pierre, la libération de grain de corindon en forme colonne et plaque est le cavolinite associé.



Figure III.10: Corindon (sous la lumière Orthogonale).

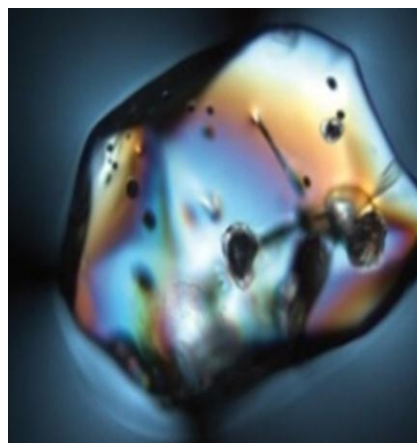


Figure III.11: Corindon.

III-4-2-3-3 Raison possible

- Dérivée de l'érosion écaillée par l'attaque de briques.
- Substance associée de pierre résultant de l'arrosion de brique de mullite (tel que le mur suspendu en L de zone avant).

Chapitre III Identification et élimination des défauts de fusion

- Substance associée de pierre résultant de l'érosion de brique d'argile.
- Dérivée écaillée de briques au corindon α et β .
- Inclusions de zirconate d'aluminium, d'aluminium de silice (brique d'argile) et de silico-alumineuse (briques au corindon de mullite) dans les matières premières.

III-4-2-3-4 Des mesures à prendre

- Il est interdit strictement de varier à grande échelle la température et la fluctuation fréquente de niveau de liquide, il peut se produire l'érosion grave contre la paroi du four dans ces deux circonstances.
- Il faut bien garder la qualité des matières premières pour éviter d'y introduire.

III-4-2-4 Goutte de voûte

III-4-2-4-1 Aspect extérieur

Ce sont des pierres non transparentes et semi-transparentes en blanc, gris, couleur foncée et noir clair avec la dimension différente, le centre de pierre est en brique ronde, il y a de variation d'érosion de dissolution et de cristal de dissection au bord. Le moirage de côté de pierre est plus grand avec la fissure toujours.

III-4-2-4-2 Microstructure

Elles sont en cristal de cristobalite et en quartz phosphoré, et le corps cristallin est plus gros. Le quartz phosphoré est en double tête de lance en jaune clair, la partie convexe est plus basse, la lumière orthogonale est grande, il y a deux couleurs gris et jaune clair.



Figure III.12: Cristobalite en
Forme ossature.



Figure III.13: Quartz phosphoré en
Forme plaque.

III-4-2-4-3 Raison possible

Du fait que la température de fusion est plus élevée, il existe l'atmosphère basique dans le four et se produit le fondage de briques de silice au toit de voûte à la partie de fusion, et se forme le gouttelette de voûte ou la substance de l'érosion du mur de four, la position produit se trouve

Chapitre III Identification et élimination des défauts de fusion

entre le mur suspendu en L de zone avant et le pignon arrière de la partie de fusion. La position différente, l'autre composition et la composition rationnelle sont aussi différentes.

- Il se produit au mur suspendu en L de zone avant l'arrangement cristallin n'est pas aligné.
- Il se produit au centre de toit de voûte de zone avant l'arrangement cristallin est bien aligné en forme mais ou grain bloc.
- Il se produit au bord de toit de voûte de zone avant l'arrangement cristallin est comme le mur suspendu en L.
- Il se produit au toit de voûte de position de point de chaleur, la température de cette position est relativement basse, la composition basique et la dérivée de dissolution de soude de sulfate sont faciles à se condenser ici, l'attaque est plus grave et l'arrangement cristallin est bien aligné.
- Il se produit au pignon de la partie de fusion, en forme substance de condensation fondue, il y a de l'élément de soufre dans le cristal.

III-4-2-4-4 Des mesures à prendre

- Diminuer la diffusion de matières en poudre de zone avant du four de fusion et la volatilisation de composition de charges vitrifiables.
- Régler l'angle de flamme et réduire la déperdition de flamme contre le toit de voûte.
- Il peut rendre en compte de diminuer convenablement la température du four de fusion à condition préalable de ne pas gêner le.
- Diminuer plus possible la quantité de soude de sulfate de l'agent de décantation à condition préalable de satisfaire à la décantation.
- Traiter régulièrement le rideau d'accrochage de pignon.
- Augmenter la qualité d'huile dense, abaisser la teneur en humidité et stabiliser le débit d'air et la pression du four.

III-4-2-5 Pierre de Trydimite et Cristobalite (Cristal de dissection siliceux)

III-4-2-5-1 Aspect extérieur

Elle se présente comme l'inclusion semi-transparente en blanche et laiteuse dans le verre, parfois en grain, parfois en grappe, parfois un tout petit peu sur le ruban du verre, il répand complètement toute la plaque du verre plus grave.

Chapitre III Identification et élimination des défauts de fusion

III-4-2-5-2 Microstructure

Le cristal est de cristobalite en ossature, une partie à la libération de cristobalite en branche d'arbre.



Figure III.14: Cristobalite en ossature.

III-4-2-5-3 Raison possible

- Hétérogène de mélange de charges vitrifiables.
- Phase du verre de matériaux réfractaire de fuite entre dans le verre fondu.
- Séparation de sable siliceux et d'agent de fusion résultant de la séparation de couche de charges vitrifiables ; la séparation de couche au cours de transport et dans le silo de tête du four.
- Pierre réfractaire au siliceux entre dans le four la deuxième fois et forme en phase local de haute silice après la fusion encore une fois.

III-4-2-5-4 Des mesures à prendre

- Prendre des mesures nécessaires pour assurer l'homogénéité de charges vitrifiables.
- Assurer l'humidité et la température de charges vitrifiables et diminuer la séparation de couche de charges vitrifiables.
- Stabiliser le régime de la température de fusion.
- Eliminer des inclusions de grande pierre dans le ruban du verre.

III-4-2-6 Pierre de sulfate de soude

III-4-2-6-1 Aspect extérieur

Cette sorte de pierre est en noyau de jujube pour la plupart, remplit le cristal blanc là-dedans, sur la surface supérieure de plaque du verre il y a de moirage autour de bulle et encore de grain irrégulier flottant sur la surface supérieure de plaque du verre, en couleur blanche ou laiteuse.

Chapitre III Identification et élimination des défauts de fusion

III-4-2-6-2 Microstructure

Il est en forme de nuage semi-transparent avec la fissure, en couleur vive d'intervention sous la lumière orthogonale de microscope, sans clair.



Figure III.15: Pierre de sulfate de soude (sous la lumière orthogonale).

III-4-2-6-3 Raison possible

- Teneur en sulfate de soude est plus, il se produit surplus de nitro-eau sur la surface de liquide du verre lors de fusion.
- Non rationnel de réglage de flamme à la zone avant, la flamme est plus forte de façon que le poudre de charbon soit brûler en avance et se produit surplus de sulfate de soude.
- Température de point chaud est basse, la propriété oxydante de l'atmosphère d'espace est forte de manière que le sulfate de soude fondu n'eut pas le temps de dissoudre et d'évacuer, et rester dans le verre fondu.
- Surplus de quantité d'ajoutée de sulfate de soude résultant de dérangement de bascule de sulfate de soude ou l'erreur d'importation de dosage de matières.
- Enrichissement local de sulfate de soude dans des charges vitrifiables à cause de l'erreur du système de prémélange de sulfate de soude et de poudre de charbon.
- On n'installe pas la grille de vibration lors de chargement de sulfate de soude de façon de mélanger le gros grain de sulfate de soude.
- Sulfate de soude condensé tombe dans le reflux de formage à l'endroit plus froid de l'ouverture de brûleur, de l'entrée de canal et du bain d'étain ainsi que de l'agitateur.
- Teneur en poudre de charbon est plus bas.
- Teneur en soufre dans l'huile lourd est plus.

Chapitre III Identification et élimination des défauts de fusion

III-4-2-6-4 Des mesures à prendre

- Régler la teneur en sulfate de soude et limiter la quantité d'ajoutée de sulfate de soude.
- Régler convenablement l'atmosphère de flamme à la zone avant en associant la quantité d'utilisation de sulfate de soude et de poudre de charbon afin d'assurer la dissolution partielle de sulfate de soude à la zone avant.
- Augmenter convenablement la température de point chaud et régler l'atmosphère neutre de flamme à l'atmosphère réductrice.
- Vérifier la bascule de sulfate de soude et assurer la précision de pesage.
- Vérifier le dosage d'importation de l'ordinateur, s'il y a de fautes matières ; il faut sortir à l'heure.
- Contrôler le système de prémélange de sulfate de soude et de poudre de charbon et assurer le fonctionnement régulier.
- Nettoyer à temps voulu la substance condensée sur le canal, l'entrée du bain d'étain et l'agitateur.
- Augmenter la température de décantation.
- Limiter la teneur en soufre de combustible, si la teneur en soufre est plus ; il faut régler le dosage de matières.
- Il faut équiper de grille de vibration de diamètre convenable de trous à l'ouverture de chargement de sulfate de soude.

III-4-2-7 Pierre calcaire siliceuse

III-4-2-7-1 Aspect extérieur

C'est une impureté de cristal de dissection semi-transparente en chenille et en pelote dans le ruban du verre.

III-4-2-7-2 Microstructure

Elle est en bague, en plaque et en radiation ou le cristal en montant d'angle mince.

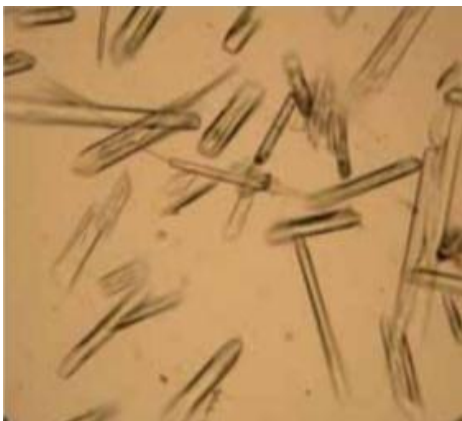


Figure III.16: Pierre calcaire siliceux en bague.



Figure III.17: Pierre calcaire en radiation.

Chapitre III Identification et élimination des défauts de fusion

III-4-2-7-3 Raison possible

- Hétérogène de mélange de charges vitrifiables, le calcaire avec plus de quantité.
- Erreur de pesage de calcaire ou faute de dosage de matières, erreur de calcul de dosage entraînent plus de quantité de calcaire.
- Apparition de gros grain de calcaire ou le poudre fin est aggloméré après les pluies.
- Mauvaise homogénéité de liquide du verre ou la fluctuation de convection et tourbillonnage en haut de liquide du verre au fond de four (principalement pour la zone arrière (le cinquième et le sixième port)).
- Liquide froid du verre à l'angle mort (les coins de la zone d'affinage) entre dans le reflux de formage.
- Non rationnel du régime de l'abaissement de température de refroidissement de liquide du verre.

III-4-2-7-4 Des mesures à prendre

- Homogénéité de charges vitrifiables.
- Vérifier le bascul de calcaire et l'importation de dosage de matières de l'ordinateur, assurer la précision et sans erreur.
- Vérifier le grain de calcaire s'il y a plus de gros grain et de poudre fin, le calcaire humide utilisera après séchage.
- Assurer la bonne homogénéité de liquide du verre pour éviter l'enrichissement local de calcaire riche.
- Eviter que le liquide froid du verre provenant du bord de la partie de refroidissement et à l'angle mort de pignon arrière entre dans le reflux de formage, s'il y en a, il faut prendre des mesures pour les résoudre.
- Maintenir le régime rationnel de l'abaissement de température de refroidissement de liquide du verre.

Chapitre III Identification et élimination des défauts de fusion

III-4-3 Défauts « Rayures »

III-4-3-1 Aspect extérieur

La rayure appelle le muscle, on peut l'observer dans le bord de ruban du verre sous l'angle différent. Le muscle fin : il est brillante, la largeur < 2mm, le muscle fin qui a une limite plus claire avec le verre peut être observé sous l'angle 90°, et le muscle fin qui a une limite pas claire avec le verre doit être observé sous l'angle <90°.

Le muscle gros: la largeur est environ de 2 ~ 5 mm on peut l'observer sous l'angle 90°.

III-4-3-2 Microstructure

On ne peut pas distinguer avec le verre sur la microstructure, quand la composition chimique est grande différente que le verre, il peut identifier sous la lumière, tel que la distinction sera effectuée au moyen de la réfractivité.

III-4-3-3 Raison de formation

La formation de rayure à trois raisons : hétérogénéité chimique, hétérogénéité thermique et hétérogénéité mécanique.

- L'hétérogénéité chimique est causée par la différence entre la composition chimique partielle et le corps du verre.
- L'hétérogénéité thermique est causée par la différence de la température partielle au cours d'écoulement de liquide du verre.
- L'hétérogénéité mécanique est causé par l'hétérogène partielle de ruban du verre sous la température plus basse, plus grande viscosité de liquide du verre et l'effet mécanique.

III-4-3-3-1 Hétérogénéité chimique

- Hétérogénéité de mélange de charges vitrifiables.
- Plus de poudre fin dans les charges vitrifiables, tel que bloc aggloméré.
- Mauvaise homogénéisation du verre fondu.
- Gros grain dans feldspath ou sable siliceux.
- Hétérogénéité chimique partiel de liquide du verre résultant de chargement hétérogène de calcin.
- Gouttelette de liquide formée par la poudre fin volatilisé dans les charges vitrifiables après la fusion à l'endroit de la température plus élevée à la partie supérieure du four de fusion descend dans le liquide du verre.
- Phase du verre des matériaux réfractaires entre dans le liquide du verre par fuite de brique.
- Inclusion solide de grande dimension dans le calcin n'est pas encore éliminée, et peut se former après l'entrée de nouveau dans le four.

Chapitre III Identification et élimination des défauts de fusion

- Cristal de dissection résultant de fond du four ou d'autre raison entre dans le courant de liquide du verre de la température plus élevée, et se forme la rayure après la dissolution de cristal.
- Il existe la symétrie thermique ou la symétrie de mont de matières à deux côtés du four de fusion.
- On trompe les déchets déposés longtemps jeté dans le four lors de nettoyage de silo de matières à la tête de four et se forme le muscle partiel de verre 90°.

III-4-3-3-2 Hétérogénéité thermique

- Muscle non stable résultant de la fluctuation de convection.
- Température d'eau de refroidissement d'agitation plus basse peut se former le muscle de l'hétérogénéité thermique.
- Hétérogénéité de champ de température de liquide du verre à basse température.

III-4-3-3-3 Hétérogénéité mécanique

C'est causé par la rayure qui ne peut pas reprendre en appuyant sur la tension de surface au cours de l'opération.

III-4-3-4 Des mesures à prendre

Selon le résultat d'analyse optique, de composition chimique et de densité, il peut prendre des mesures suivantes pour distinguer la raison de formation de rayure

- Contrôler strictement l'homogénéisation de charges vitrifiables.
- Contrôler strictement le domaine de granulométrie de limite supérieure et inférieure de feldspath et de sable siliceux pour éviter d'avoir plus de gros grain et de poudre ultrafin.
- Régler la courbe de la température du four de fusion pour bien homogénéiser le liquide du verre.
- Eviter d'apporter le liquide froid du verre à l'angle mort dans le courant de formage, renforcer l'isolant et l'étanchéité de canal pour éviter de déposer le liquide froid de verre au bord de canal, il faut périodiquement l'éliminer.
- Choisir les matériaux réfractaires de bonne qualité (prendre des mesures convenables d'abaissement de température), et diminuer la fuite de phase du verre des matériaux réfractaires.
- Défense d'entrer dans le four le calcin qui contient la pierre de gros grain.
- Stabiliser la température au fond du four et assurer la stabilisation de courant de liquide dans le four.
- Contrôler la température de sortie d'eau de refroidissement.

Chapitre III Identification et élimination des défauts de fusion

- Régler la vitesse de chargement de calcin et assurer l'homogénéisation de mélange de calcins et de charges vitrifiables.
- Il faut strictement vérifier de calcin et éviter d'entrer dans le four le calcin qui est la grande différence que la composition chimique de charges vitrifiables et de grande dimension.
- Stabiliser la température au fond du four (il faut particulièrement faire attention à la stabilisation de fer dans les charges vitrifiables, lors que le teneur en fer est varié dans la composition du verre et veuillez le réglage de température).
- Maintenir la symétrie de mont de matières à deux côtés du four de fusion.
- Eviter les déchets déposés longtemps d'entrer dans le four de fusion.

III-4-4 Déformation optique

III-4-4-1 Aspect extérieur

Observer en ligne qu'il y a de déformation optique sur la surface de la plaque du verre, et sa largeur est supérieure que la rayure, l'angle de déformation optique est trop petit dans le cas de la détection du verre au moyen de méthode de zébra.

III-4-4-2 Microstructure

Ce sont des cristaux, c'est seulement que la nature optique est différent que le verre.

III-4-4-3 Raison possible

Peut être classée en deux grandes catégories : hétérogénéité chimique et hétérogénéité thermique.

III-4-4-3-1 Hétérogénéité chimique

- Hétérogénéité de mélange de charges vitrifiables et de calcin.
- Séparation de couche de transport de charges vitrifiables et de stockage de silo de matières à la tête de four.
- Mal contrôle de granulométrie de toutes les matières premières et de calcin.
- Hétérogénéité chimique résultant de changement de matières.

III-4-4-3-2 Hétérogénéité thermique

- Mauvaise homogénéisation.
- Fluctuation de convection dans le four.
- Hétérogénéité d'agitation.
- Erreur de la température à deux côtés du four.

Chapitre III Identification et élimination des défauts de fusion

III-4-4-4 Des mesures à prendre

- Assurer l'homogénéisation de charges vitrifiables.
- Réduire la séparation de couche des matières premières au cours de transport et de stockage de silo de matières à la tête de four (la trémie).
- Contrôler strictement la granulométrie de toutes les matières premières selon le standard de contrôle de qualité.
- Régler la vitesse de chargement et assurer l'homogénéisation de calcin.
- Contrôler strictement la granulométrie de calcin selon le manuel de contrôle.
- Régler la courbe de la température du four de fusion pour bien homogénéisation du verre.
- Prendre des mesures pour éviter le verre froid d'entrer dans le courant de travail.
- Stabiliser le système de la température, assurer la stabilisation de courant de liquide.
- Régler la vitesse de rotation d'agitation et la profondeur de pénétration dans le liquide du verre.
- Eviter fréquemment de changer de sable et causer la fluctuation de courant.
- Limiter l'enfournement et éviter l'hétérogène de température à deux côtés résultant de déviation de matière[26] .

Conclusion

En conclusion, ce chapitre sur l'identification et l'élimination des défauts de fusion dans la fabrication du verre a mis en évidence l'importance des paramètres clés de four tel que la flamme, la pression et les courants convectifs, ainsi que l'utilisation de briques réfractaires de haute qualité pour minimiser les défauts du verre. Les défauts liés aux gaz tel que les bulles, peuvent être causés par une mauvaise régulation de la flamme ou une pression inadéquate, tandis que les pierres, les rayures et les déformations optiques peuvent être dus à une contamination du verre fondu par des particules solides.

En comprenant les causes de ces défauts et en mettant en œuvre des mesures pour les minimiser ou les éliminer complètement pendant le processus de fabrication, nous pouvons améliorer la qualité du verre produit et minimiser les défauts indésirables.

En somme, une compréhension approfondie des différents types des défauts du verre et de leurs causes, ainsi que des paramètres clés du four et de l'utilisation de briques réfractaires de haute qualité, sont essentiels pour assurer la production du verre de haute qualité et minimiser les défauts indésirables.



Matériels

et

méthodes

IV-1 Matériels et méthodes

- **ISRAVISION**

Les systèmes d'inspection ISRAVISION inspectent de manière précise et fiable le linge du verre flotté, du côté chaud au côté froid ils mesurent à la fois les déformations et la planéité du verre, détectant immédiatement tout défaut dans le verre ou tout changement dans l'épaisseur et la tension.



Figure IV.1 : photographie présentant un appareil d'inspection ISRAVISION.

- **Microscope optique**

Le microscope optique est un instrument d'optique muni d'un objectif et d'un oculaire qui permet de grossir l'image d'un objet des petites dimensions et de séparer les détails de cette image afin qu'il soit observable par l'œil humain.



Figure IV.2 : photographie représentant un microscope optique de marque Leica.

- Les échantillons des défauts

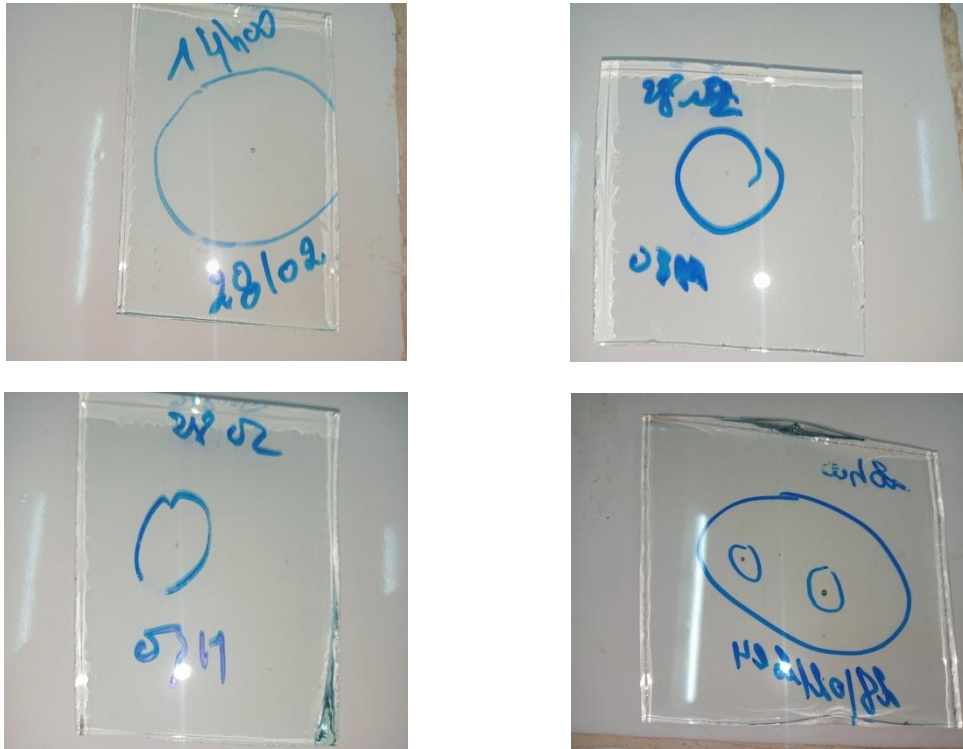


Figure IV.3 : Photographie représentant des échantillons des défauts.

Conclusion

Ces différentes méthodes permettent de détecter, classer et dimensionner les défauts dans le verre float afin de vérifier sa conformité aux normes de qualité. Elles sont utilisées tout au long du procédé de fabrication, depuis les matières premières jusqu'au produit fini, pour assurer une production du verre de hauts qualité.



Résultats

et

discussions

V-1 Analyse des défauts de jour 24/02/2024

Tableau V.1 : Rapport des prélèvements de jour 24/02/2024.

Epaisseur	Heure de prélèvement	Objectif	Type de défauts	Dimensions des défauts en (mm²)
06 mm	16h00	10	Pierre de Tridymite de face supérieure	(0.48 x0.20)
06 mm	18h00	10	Pierre de Tridymite de face supérieure	(0.90 x0.40)
06 mm	20h00	10	Pierre de Tridymite de face supérieure	(0.20 x0.18)
06 mm	20h00	10	Pierre de Tridymite de face supérieure	(0.50 x0.26)
06 mm	21h00	10	Pierre de Tridymite de face supérieure	(0.60 x0.34)
06 mm	22h00	10	Pierre de Tridymite de face supérieure	(0.64 x0.38)
06 mm	00h00	10	Pierre de Tridymite de face supérieure	(1.08 x0.52)
06 mm	01h00	10	Pierre de Corindon de face supérieure	(0.32 x0.20)
06 mm	02h00	10	Pierre de Quartz de face supérieure	(0.40 x0.22)
06 mm	02h00	10	Pierre de Corindon de face supérieure	(0.60 x0.32)
06 mm	03h00	10	Pierre de Quartz de face supérieure	(0.56 x0.30)
06 mm	03h00	10	Pierre d'Oxyde d'étain de face supérieure	(0.70 x0.42)
06 mm	04h00	05	Pierre de Tridymite de face supérieure	(1.40 x0.60)
06 mm	05h00	05	Pierre d'Oxyde d'étain de face supérieure	(2.40 x1.20)
06 mm	06h00	10	Pierre de Tridymite de face supérieure	(0.60 x0.30)

V-1-1 Analyse des données du système de détection des défauts ISRAVISION

Tableau V.2 : Les classes des défauts par ISRAVISION de jour 24/02/2024.

	Types de défauts	Nombre de défauts par classe				
		CL1	CL2	CL3	CL4	CL5
Inclusions gazeuses	Bulle d'air	35	2486	1269	354	340
Inclusions solides	Pierre	16	849	396	178	206
Autres	Larme	02	37	42	04	88
	Fil Larme	00	00	00	00	00
	Drip	00	00	00	00	00
	ETC	130	195	144	56	65

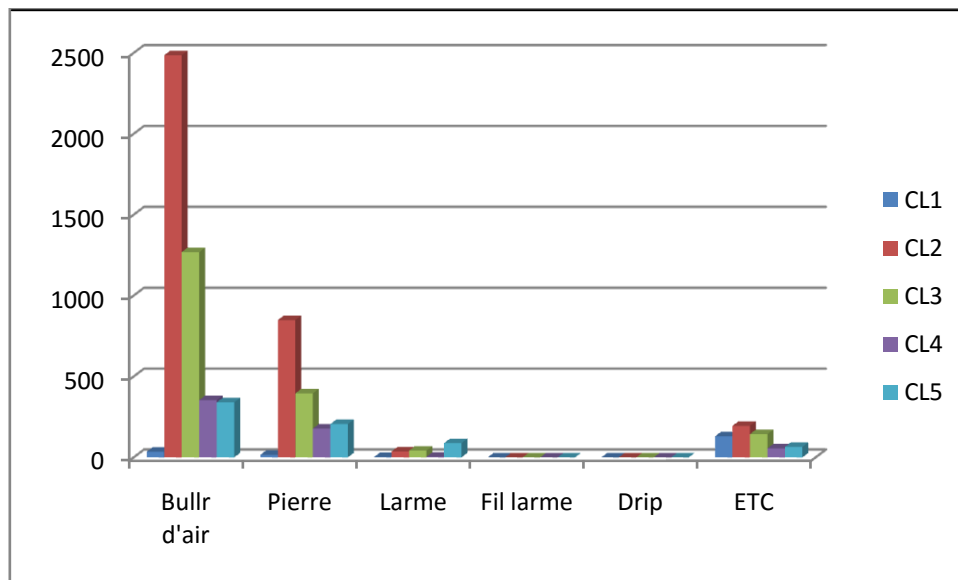


Figure V.1 : Histogramme représentant les classes des défauts par ISRAVISION de jour 24/02/2024.

V-1-2 Résultat

Tableau V.3 : Les types des défauts et leurs fractions de jour 24/02/2024.

Type de défaut	Pierre de Tridymite	Pierre de Corindon	Pierre de Quartz	Pierre d'oxyde d'étain
Le nombre	09	02	02	02
Fraction (%)	60	13,33	13,33	13, 33

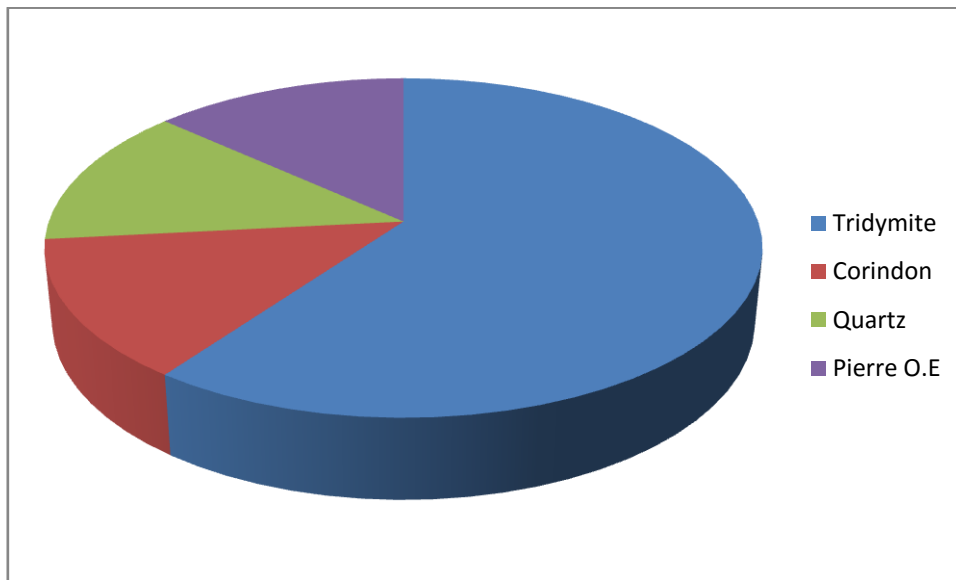


Figure V.2 : Résultat d'analyse des défauts le jour 24/02/2024.

V-2 Analyse des défauts de jour 28/02/2024

Tableau V.4 : Rapport des prélèvements de jour 28/02/2024.

Epaisseur	Heure de prélèvement	Objectif	Type de défauts	Dimensions des défauts en (mm ²)
5,5 mm	08h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
5,5 mm	08h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
5,5 mm	08h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
5,5 mm	08h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.66 x0.52)
5,5 mm	08h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.20 x0.18)
5,5 mm	08h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.16 x0.12)
5,5 mm	08h00	10	Bulle d'air de face inférieure	(0.40 x0.32)
5,5 mm	08h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
5,5 mm	08h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
5,5 mm	09h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.24 x0.20)
5,5 mm	09h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.28 x0.24)
5,5 mm	09h20	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.20 x0.16)
5,5 mm	09h20	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
5,5 mm	09h30	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
5,5 mm	09h30	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.26 x0.22)
5,5 mm	09h30	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
5,5 mm	09h30	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.10 x0.08)

08 mm	12h00	10	La Laine de verre de face supérieure	/
08 mm	12h00	10	La Laine de verre de face supérieure	/
08 mm	12h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	12h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	12h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	12h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
08 mm	12h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
08 mm	13h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.12 x0.10)
08 mm	14h00	10	Bulle d'air de face inférieure	(0.28 x0.26)
08 mm	14h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
08 mm	14h00	05	Bulle d'air au milieu	(1.66 x1.64)
08 mm	15h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.32 x0.28)
08 mm	15h00	10	Pierre de Zircon de face inférieure	/
08 mm	15h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
08 mm	15h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
08 mm	15h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
08 mm	15h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure (Traces de rouleaux)	/
08 mm	15h00	10	Bulle d'air de face inférieure	(0.12 x0.10)
08 mm	16h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.16 x0.16)
08 mm	17h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/

08 mm	17h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
08 mm	17h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
08 mm	17h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
08 mm	17h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.10 x0.208)
08 mm	17h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.16 x0.12)
08 mm	17h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.14 x0.12)
08 mm	17h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	17h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	18h00	10	Bulle d'air de face inférieure	(0.52 x0.46)
08 mm	18h00	05	Bulle d'air de face supérieure	(5.00 x3.94)
08 mm	18h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	18h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	18h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	19h00	10	Pierre d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	19h00	10	Pierre d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	19h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	19h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	19h00	10	Pierre d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	20h00	10	Pierre d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	20h00	10	Pierre d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	22h00	10	Pierre d'Etain de face supérieure	/
08 mm	23h00	05	Bulle d'air de face supérieure	(2.10 x2.0)

V-2-1 Analyse des données du système de détection des défauts ISRAVISION

Tableau V.5 : Les classes des défauts par ISRAVISION de jour 28/02/2024.

	Types de défauts	Nombre de défauts par classe				
		CL1	CL2	CL3	CL4	CL5
Inclusions gazeuses	Bulle d'air	40	2345	1432	354	386
Inclusions solides	Pierre	20	876	397	183	207
Autres	Larme	04	30	46	07	75
	Fil Larme	00	00	00	00	00
	Drip	00	00	00	00	00
	ETC	135	180	146	60	55

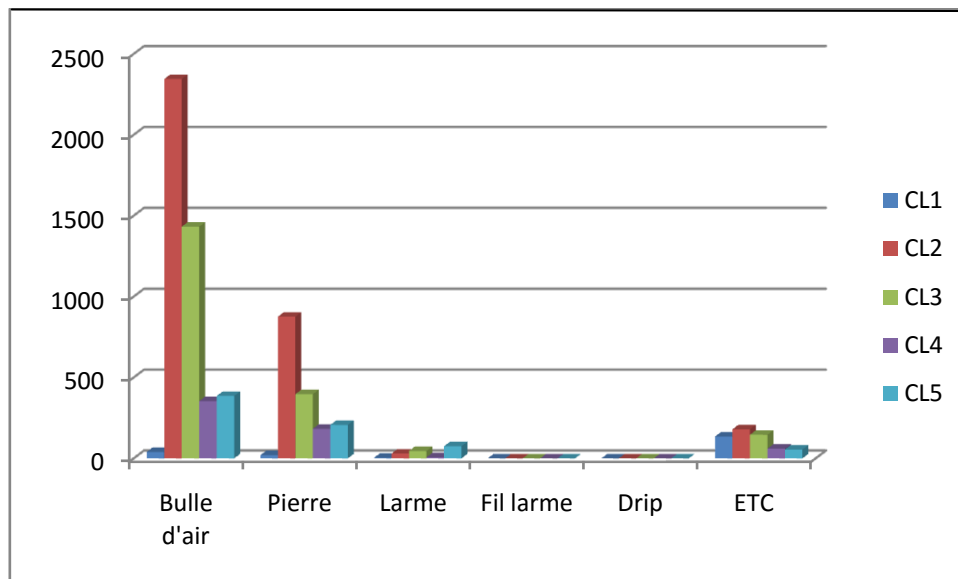


Figure V.3 : Histogramme représentant les classes des défauts par ISRAVISION de jour 28/02/2024.

V-2-2 Résultat

Tableau V.6 : Les types des défauts et leurs fonctions de jour 28/02/2024.

Type de défauts	Tache d'oxyde d'étain	Bulle d'air	Pierre d'oxyde d'étain	La laine de verre	Pierre de zircon
Nombre	29	21	06	02	01
Fraction (%)	49,15	35,59	10,16	3,38	1,69

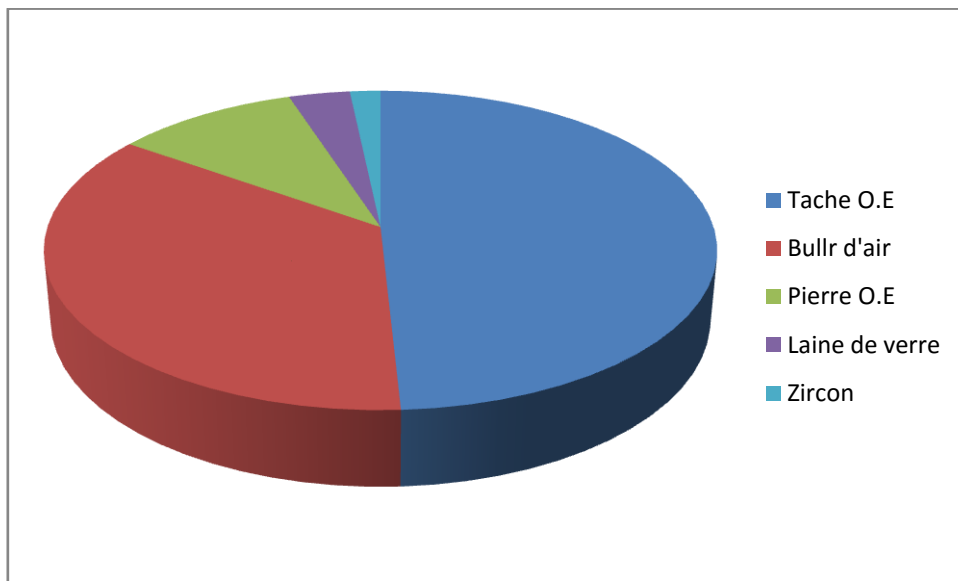


Figure V.4 : Résultats d'analyse des défauts le jour 28/02/2024.

V-3 Analyse des défauts de jours 29/02/2024

Tableau V.7 : Rapport des prélèvements de jour 29/02/2024.

Epaisseur	Heure de prélèvement	Objectif	Type de défauts	Dimensions des défauts en (mm ²)
08 mm	00h00	10	Bulle d'air de face inférieure	(1.0 x0.70)
08 mm	02h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.24 x0.24)
08 mm	03h00	10	Pierre de Zircon de face supérieure	/
08 mm	03h00	10	Pierre de Zircon de face supérieure	/
08 mm	04h00	10	Pierre de Zircon de face supérieure	/
08 mm	05h00	10	Pierre de Zircon de face supérieure	/
08 mm	08h00	10	Déformation optique de face supérieure	/
08 mm	09h00	10	Pierre de Zircon de face supérieure	/
08 mm	10h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.26 x0.22)
08 mm	10h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	11h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	11h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
08 mm	12h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
08 mm	12h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
08 mm	12h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	12h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	12h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.10 x0.08)
08 mm	13h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.12 x0.08)
08 mm	14h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.24 x0.20)

08 mm	14h00	05	Bulle d'air de sulfate de face supérieure	(1.48 x1.28)
08 mm	15h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	15h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	15h00	05	Bulle d'air de sulfate de face supérieure	(1.22 x1.12)
08 mm	15h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
08 mm	15h00	10	Pierre de Corindon de face inférieure	/
08 mm	16h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	16h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	16h00	10	Bulle d'air de face inférieure	(0.30 x0.28)
08 mm	16h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
08 mm	17h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	17h00	10	Pierre d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	17h00	10	Pierre de Quartz de face inférieure	/
08 mm	17h00	10	Bulle d'air de face inférieure	(0.30 x0.26)
08 mm	17h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.32 x0.28)
08 mm	17h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
08 mm	17h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
08 mm	18h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	18h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/

08 mm	18h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	18h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.08 x0.08)
08 mm	18h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.12 x0.10)
08 mm	18h00	10	Déformation optique de face supérieure	/
08 mm	18h00	10	Bulle d'air de face inférieure	(0.20 x0.18)
08 mm	18h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	18h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	18h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
08 mm	18h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
08 mm	18h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
08 mm	19h00	10	Bulle d'air de face inférieure	(0.22 x0.20)
08 mm	19h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.10 x0.10)
08 mm	19h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.12 x0.10)
08 mm	19h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.56 x0.54)
08 mm	19h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	19h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	19h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	19h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
08 mm	21h00	10	Bulle d'air de sulfate de face supérieure	(1.08 x0.96)
08 mm	22h00	05	Bulle d'air de sulfate de face supérieure	(1.88 x1.52)
08 mm	23h00	10	Bulle d'air de face inférieure	(0.96 x0.84)

V-3-1Analyse des données du système de détection des défauts ISRAVISION

Tableau V.8 : Les classes des défauts par ISRAVISION de jour 29/02/2024.

	Types de défauts	Nombre de défauts par classe				
		CL1	CL2	CL3	CL4	CL5
Inclusions gazeuses	Bulle d'air	50	2653	1764	387	359
Inclusions solides	Pierre	12	865	356	198	200
Autres	Larme	05	34	47	02	76
	Fil Larme	00	00	00	00	00
	Drip	00	00	00	00	00
	ETC	124	178	134	76	56

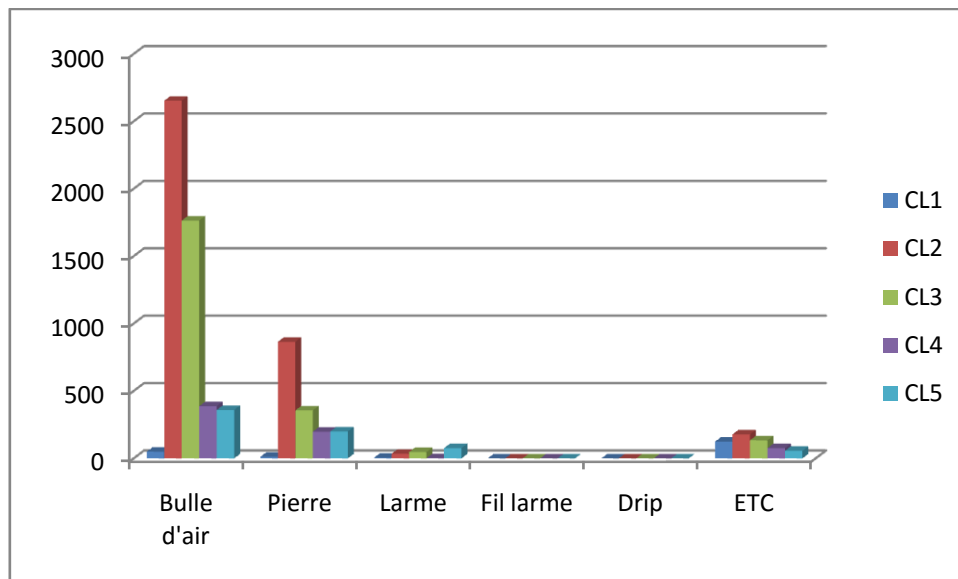


Figure V.5 : Histogramme représentant les classes des défauts par ISRAVISION de jour 29/02/2024.

V-3-2 Résultat

Tableau V.9 : Les types des défauts et leurs fonctions de jour 29/02/2024.

Type de défauts	Tache d'oxyde d'étain	Bulle d'air	Pierre de zircon	Pierre d'oxyde d'étain	Déformation optique	Pierre de corindon	Pierre de quartz
ombre	28	21	05	03	02	01	01
Fraction (%)	45,90	34,42	8,19	4,91	3,27	1,63	1,63

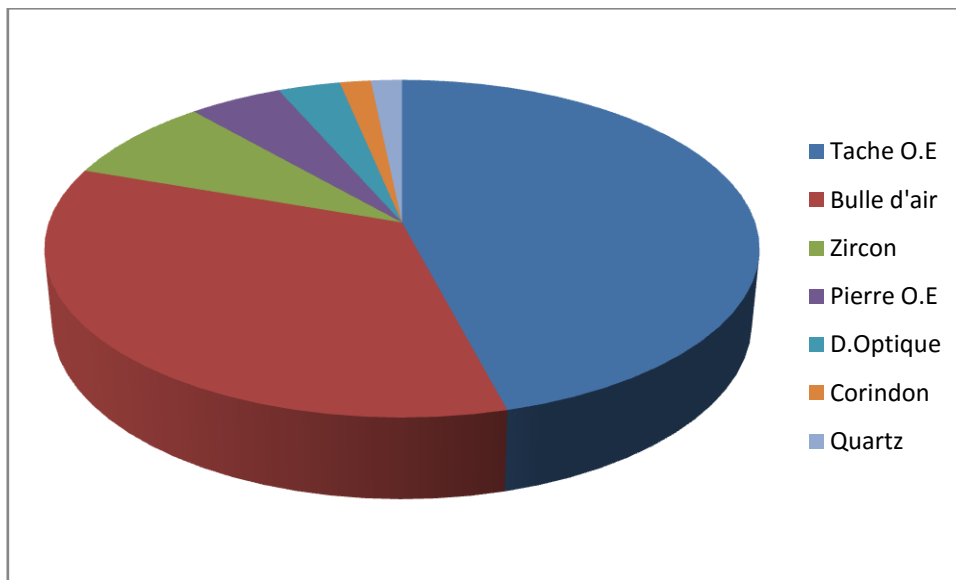


Figure V.6 : Résultats d'analyses des défauts le jour 29/02/2024.

V-4 Analyse des défauts de jours 01/03/2024

Tableau V.10 : Rapport des prélèvements de jour 01/03/2024.

Épaisseur	Heure de prélèvement	Objectif	Type de défauts	Dimensions des défauts en (mm²)
08 mm	01h00	10	Bulle d'air de face inférieure	(0.40 x0.36)
08 mm	02h00	10	Série de pierres du verre cristallisé (cristobalite) de face supérieure	/
08 mm	03h00	10	Pierre métallique de nature ferrique de face inférieure	/
08 mm	04h00	10	Pierre de Zircon de face supérieure	/
08 mm	05h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.82 x0.24)
08 mm	08h00	10	Bulle d'air de face inférieure	(0.30 x0.30)
08 mm	08h00	10	Pierre de Quartz de face supérieure	/
08 mm	09h00	10	Pierre de Quartz de face supérieure	/
08 mm	09h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	10h00	10	Bulle d'air de face inférieure	(0.32 x0.32)
08 mm	11h00	10	Bulle d'air de face inférieure	(0.30 x0.30)
08 mm	15h00	10	Bulle d'air de face inférieure	(0.60 x0.60)
08 mm	16h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.14 x0.14)
08 mm	17h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.10 x0.10)
08 mm	17h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.10 x0.10)
08 mm	18h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.12 x0.12)
08 mm	18h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.14 x0.14)

08 mm	19h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.16 x0.16)
08 mm	20h00	10	Bulle d'air de sulfate de face supérieure	(1.20 x1.20)
08 mm	23h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.14 x0.12)
08 mm	23h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.10 x0.08)
08 mm	23h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.14 x0.12)
08 mm	23h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.10 x0.08)
08 mm	23h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.14 x0.12)
08 mm	23h15	10	Pierre du verre cristallisé (cristobalite) de face supérieure	/
08 mm	23h15	10	Pierre du verre cristallisé (cristobalite) de face supérieure	/
08 mm	23h15	10	Pierre du verre cristallisé (cristobalite) de face supérieure	/
08 mm	23h15	10	Pierre du verre cristallisé (cristobalite) de face supérieure	/
08 mm	23h15	10	Pierre du verre cristallisé (cristobalite) de face supérieure	/
08 mm	23h15	10	Pierre du verre cristallisé (cristobalite) de face supérieure	/

V-4-1 Analyse des données du système de détection des défauts ISRAVISION

Tableau V.11 : Les classes des défauts par ISRAVISION de jour 01/03/2024.

	Types de défauts	Nombre de défauts par classe				
		CL1	CL2	CL3	CL4	CL5
Inclusions gazeuses	Bulle d'air	28	2564	1234	320	330
Inclusions solides	Pierre	12	830	300	187	210
Autres	Larme	02	54	40	03	78
	Fil Larme	00	00	00	00	00
	Drip	00	00	00	00	00
	ETC	135	187	129	45	55

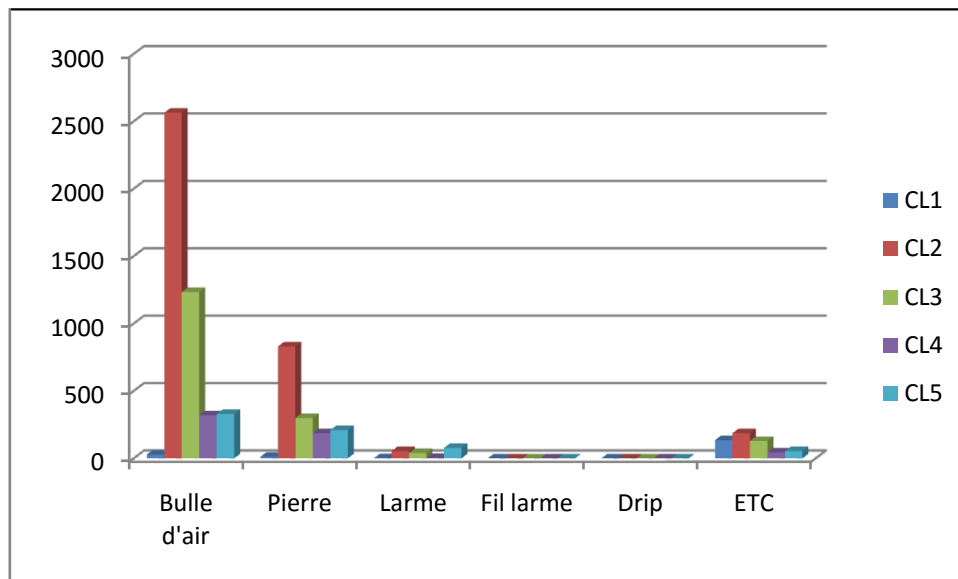


Figure V.7 : Histogramme représentant les classes des défauts par ISRAVISION de jour 01/03/2024.

V-4-2 Résultat

Tableau V.12 : Les types des défauts et leurs fonctions de jour 01/03/2024.

Type de défauts	Bulle d'air	Pierre de cristobalite	Pierre de quartz	Tache d'oxyde d'étain	Pierre métallique	Pierre de zircon
Nombre	18	07	02	01	01	01
Fraction (%)	60	23,33	6,66	3,33	3,33	3,33

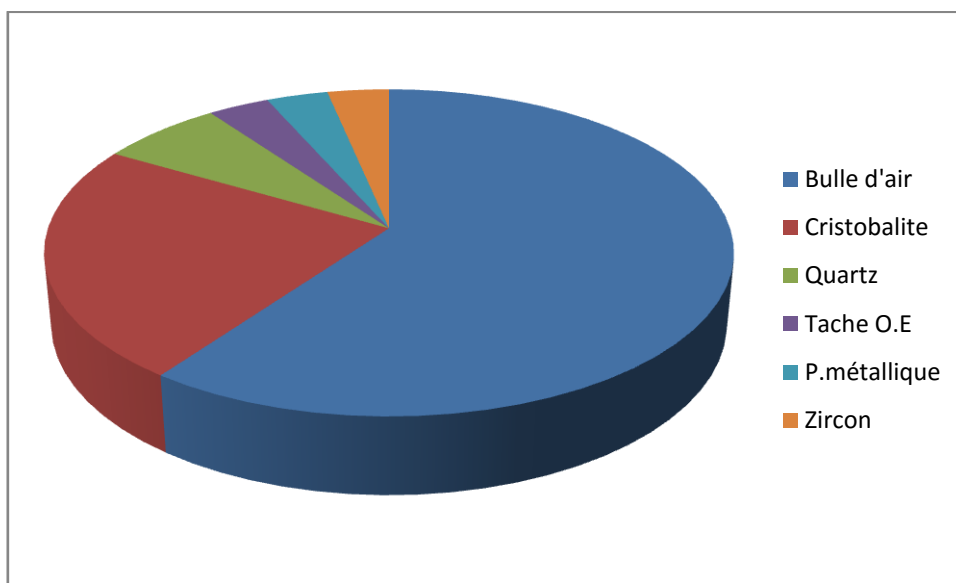


Figure V.8 : Résultat d'analyse des défauts le jour 01/03/2024.

V-5 Analyse des défauts de jours 02/01/2024

Tableau V.13 : Rapport des prélèvements de jour 02/01/2024.

Epaisseur	Heure de prélèvement	Objectif	Type de défauts	Dimensions des défauts en (mm ²)
08 mm	00h00	10	Pierre du verre cristallisé (cristobalite) de face supérieure	/
08 mm	00h00	10	Pierre de Zircon de face inférieure	/
08 mm	01h00	10	Pierre de Zircon de face supérieure	/
08 mm	02h00	10	Pierre du verre cristallisé (cristobalite) de face supérieure	/
08 mm	03h00	10	Pierre d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	03h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.44 x0.40)
08 mm	03h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.10 x0.08)
08 mm	03h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.12 x0.10)
08 mm	04h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	06h00	10	Déformation optique de face supérieure	/
08 mm	07h00	10	Pierre d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	08h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	08h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	09h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	09h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	10h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	11h00	10	Pierre d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	12h00	10	Pierre d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/

08 mm	13h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	14h00	10	Tache d'Oxyde d'Etain de face inférieure	/
08 mm	15h00	10	Pierre d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	16h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.12 x0.12)
08 mm	18h00	05	Bulle d'air de sulfate de face supérieure	(2.10 x2.10)
08 mm	18h00	10	Pierre de Zircon de face supérieure	/
08 mm	19h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.14 x0.14)
08 mm	19h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.12 x0.12)
08 mm	20h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.14 x0.12)
08 mm	20h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.14 x0.16)
08 mm	21h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.12 x0.14)
08 mm	22h00	10	Pierre d'Oxyde d'Etain de face supérieure	/
08 mm	22h00	10	Bulle d'air de face inferieure	(0.40 x0.36)
08 mm	22h00	10	Bulle d'air de face inferieure	(0.12 x0.10)
08 mm	23h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.14 x0.10)
08 mm	23h00	10	Bulle d'air de face supérieure	(0.16 x0.12)
08 mm	23h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.16 x0.14)
08 mm	23h00	10	Bulle d'air au milieu	(0.14 x0.14)

V-5-1 Analyse des données du système de détection des défauts ISRAVISION

Tableau V.14 : Les classes des défauts par ISRAVISION de jour 02/03/2024.

	Types de défauts	Nombre de défauts par classe				
		CL1	CL2	CL3	CL4	CL5
Inclusions gazeuses	Bulle d'air	46	2435	1296	340	354
Inclusions solides	Pierre	14	876	370	165	200
Autres	Larme	08	43	37	04	85
	Fil Larme	00	00	00	00	00
	Drip	00	00	00	00	00
	ETC	139	180	133	65	70

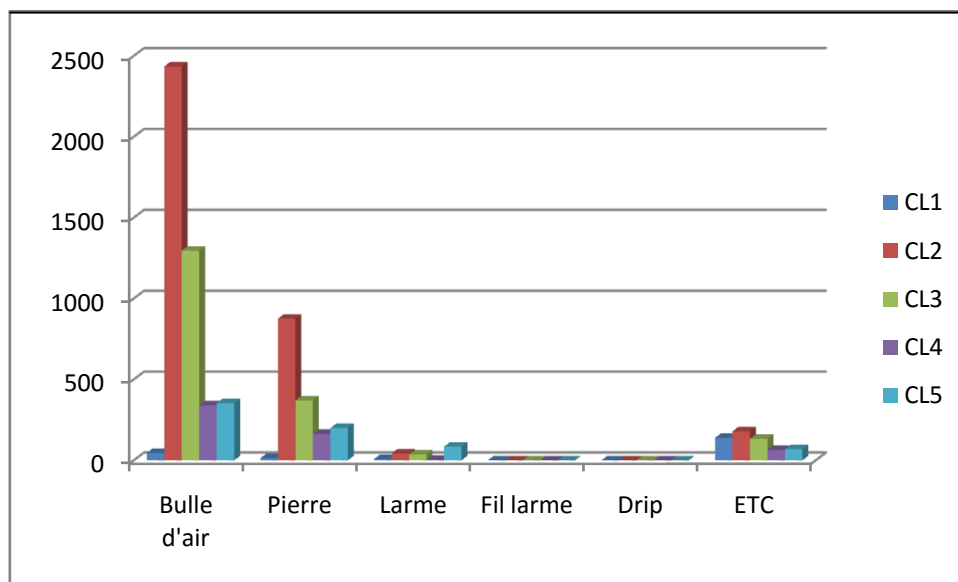


Figure V.9 : Histogramme représentant les classes des défauts par ISRAVISION

de jour 02/03/2024.

V-5-2 Résultat

Tableau V.15 : Les types des défauts et leurs fonctions de jour 02/03/2024.

Type de défauts	Bulle d'air	Tache d'oxyde d'étain	Pierre d'oxyde d'étain	Pierre de zircon	Pierre de cristobalite	Déformation optique
Nombre	16	08	06	02	02	01
Fraction(%)	45,71	22,85	17,14	5,71	5,71	2,85

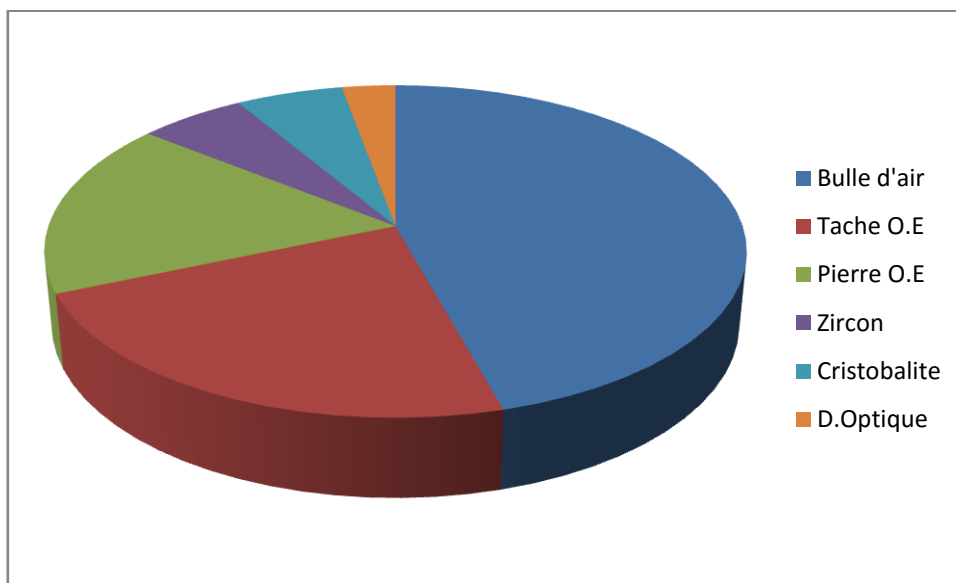


Figure V.10 : Résultats d'analyse des défauts le jour 02/03/2024.

V-6 Résultat global

Tableau V.16 : Les défauts global.

Type de défauts	Nombre	Fraction (%)
Bulle d'air	76	38
Tache d'oxyde d'étain	66	33
Pierre d'oxyde d'étain	17	8,5
Pierre de Tridymite	09	4,5
Pierre de zircon	09	4,5
Pierre de cristobalite	09	4,5
Pierre de quartz	05	2,5
Pierre de corindon	03	1,5
Déformation optique	03	1,5
La laine de verre	02	1
Pierre métallique	01	0,5

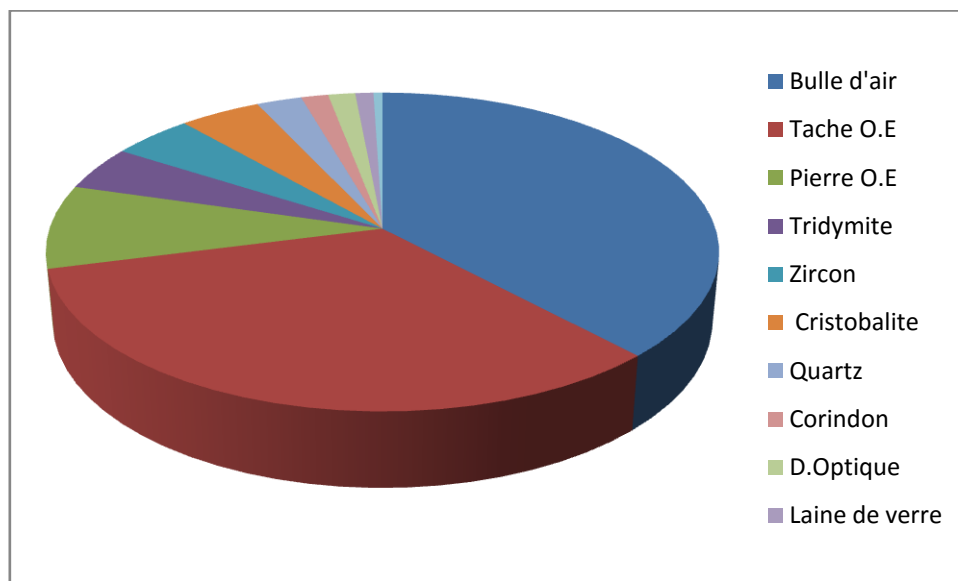


Figure V.11 : Résultat d'analyse global des défauts.

V-7 Origine des défauts et actions correctives

Type de défaut	Causes probables	Action correctives
Bulle d'air	<ul style="list-style-type: none"> - Perturbation des paramètres du four notamment d'affinage. - La fluctuation de surface de liquide fait varier l'écoulement du verre, et l'air dissout dans le liquide du verre ne peut être évacuée. - Surpression au niveau de la partie de refroidissement résultant de la fluctuation de la pression du four, le gaz ne peut être évacué. - L'atmosphère du point chaud est plus oxydée de manière que l'air peut être évacué. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vérifier la température d'affinage. - Vérifier la pression du four. - Vérifier la propreté de l'air de dilution et la structure de registre principale. - Stabiliser le système de commande automatique surface/niveau du liquide assurer l'enfournement régulier du mélange vitrifiable. - Vérifier l'atmosphère neutre de la flamme du bruleur au point chaud.
Pierre + Tache d'oxyde d'étain	<ul style="list-style-type: none"> - Perturbation des paramètres du bain d'étain. - Oxydation d'étain à l'entrée du bain « canal ». 	<ul style="list-style-type: none"> - Assurer l'étanchéité du bain d'étain. - Stabiliser le régime thermique du bain d'étain.
Pierre de corindon	<ul style="list-style-type: none"> - Erosion de la brique réfractaire de mullite et/ou celle s'argile suie à la perturbation du four du : <ol style="list-style-type: none"> 1. Régime thermique du four. 2. Niveau du verre fondu. 	<ul style="list-style-type: none"> - Stabiliser le régime du four. - Renforcer (entretenir) les parois du four. - Stabiliser le niveau du verre fondu.
Pierre de quartz + Trydimite	<ul style="list-style-type: none"> - Fusion incomplète de la silice à une perturbation du régime thermique du four. - Présence des impuretés au niveau de la matière première et calcin. 	<ul style="list-style-type: none"> - Stabiliser le régime thermique du four. - Vérifier la matière première ensilée à ordre de chargement. - Vérifier le calcin enfourné.
Pierre de zircon	<ul style="list-style-type: none"> - Erosion de la brique réfractaire AZS suite à la perturbation du : <ol style="list-style-type: none"> 1. Régime thermique du four. 2. Niveau du verre fondu. 	<ul style="list-style-type: none"> - Stabiliser le régime thermique du four. - Renforcer (entretenir) les parois du four. - Stabiliser le niveau du verre fondu.
La laine de verre	<ul style="list-style-type: none"> - Travaux d'étanchéité au niveau du bain d'étain. 	<ul style="list-style-type: none"> - Eviter la descente de la laine sur le ruban du verre.
Pierre métallique nature ferrique	<ul style="list-style-type: none"> - Une paille de fer oxydé tombée sue le verre fondu au cours de l'opération de fusion (oxydation de l'enfourneuse, intervention au four). - Inclusion de fer, mélange dans le calcin recyclé. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vérifier l'état de l'enfourneuse. - Assurer le bon fonctionnement des séparatrices magnétiques.
Pierre du verre cristallisé (cristobalite)	<ul style="list-style-type: none"> - Perturbation des paramètres du four engendrant l'apparition du verre fondu cristallisé des angles mort. 	<ul style="list-style-type: none"> - Stabiliser le régime thermique du four.
Déformation optique	<ul style="list-style-type: none"> - Erosion des briques réfractaires (siliceuse et/ou argileuse) suite à la perturbation du : <ol style="list-style-type: none"> 1. Régime thermique du four. 2. Niveau du verre fondu. - Engendrant ainsi, suite à sa fusion complète, un enrichissement du verre fondu en silice-Alumine dans un rapport de densité différent traduit par déformation. 	<ul style="list-style-type: none"> - Stabiliser le régime thermique du four. - Renforcer (entretenir) les parois du four. - Stabiliser le niveau du verre fondu.

Conclusion

Les résultats de cette étude peuvent être utilisés pour améliorer les processus de fabrication et les méthodes de contrôle de qualité dans l'industrie du verre. Des recherches supplémentaires pourraient être menées pour explorer d'autres facteurs qui influent sur les défauts du verre et pour développer des méthodes plus efficaces de contrôle de qualité.



Conclusion

générale

Conclusion générale

Ce mémoire a permis d'explorer en profondeur la problématique des défauts de fusion lors de la fabrication du verre Float, au sein de l'industrie verrière Mediterranean Float Glass à l'Arbaa wilaya de Blida.

A travers les cinq chapitres qui le composent, ce travail a d'abord établi les notions de base sur le verre, puis a analysé en détail le processus de sa fabrication. L'accent a ensuite été mis sur l'identification et élimination des différents types des défauts de fusion pouvant survenir lors cette étape cruciale. L'étude approfondie des matériaux, méthodes, résultats et discussion a permis de mieux comprendre l'origine, les causes et les impacts potentiels de ces défauts sur la qualité du produit fini (le verre). Les données collectées et les analyses effectuées offrent des pistes concrètes pour améliorer les pratiques de fabrication et minimiser la présence de ces défauts dans le verre.

Au-delà de l'identification de ces problèmes, ce mémoire propose également des recommandations et des perspectives d'amélioration continue, dans le but d'optimiser la production du verre Float de haute qualité au sein d l'entreprise.

En conclusion, ce projet de fin d'étude a apporté un éclairage approfondi sur un enjeu majeur de l'industrie verrière, contribuant ainsi à une meilleure compréhension et à une gestion plus efficace des défauts de fusion dans la fabrication du verre.



Références

bibliographiques

- [1] Ch.Shittich, et al « Construire en verre », deuxième édition, Presses polytechniques et universitaires Romandes, 2012.
- [2] D. Aboutaleb, « Les fours de l'industrie verriers », Office des publications universitaires, 2019.
- [3] H.Satha, J.Simons, Effet de la composition sur l'indice de réfraction et la densité dans le verre de silice contenant Ba, Sr et Zn, Ann. Chim. Sci. Mat, Vol. 27, N°2, PP.53-59, 2002.
- [4] J.Barton, C.Guillemet, « Le verre science et technologie », France, 2005.
- [5] H.Satha, J.Phalippou, Silica Glass from Aerosil by Sol-Gel Process: Densification and Textural Properties, International Journal of Thermophysics, Vol. 24, N°3. PP. 855-893, 2003.
- [6] C.Mai, S.Etienne, H.Satha, J.Perez, « Etude et analyse de la déformation non-élastique autour de la transition vitreuse d'un verre borosilicate », Acta. Metall. Mater, Vol.38, N°2, PP.337.343, 1990
- [7] H.Satha, K.Atamnia, F.Despetis, "Effect of drying processes on the texture of silica gels, Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology", Vol.4, PP.17-21, 2024
- [8] C.Mai, Satha, et al, SAXS, WAXD and TEAM of the early stages of crystallization in TiO_2 - ZrO_2 - MgO - Li_2O - Al_2O_3 - SiO_2 Glass, Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 108, PP. 201-206, 1989.
- [9] E. Damour, « La chimie du verre, Paris & Liège », Librairie Polytechnique CH. Béranger, 1929
- [10] H.Zeroub et M.Larbi, mémoire de fin d'étude « Le verre de bâtiment », Université M'hamed Bougara-Boumerdes, 2000.
- [11] J. Zarzycki, « Les verre et l'état vitreux », édition Masson, Paris, 1982.
- [12] P. Gilard, « physico chimie des silicates », Tome II :le verre, Edition-publicité- Impression-Soc. Bruxelles, 1947.
- [13] K.Atamnia, S.Satha, H.Satha, M.Gonon, Synthesis, structural and thermal characterization of silica glasses containing BaO, SrO and ZnO, Mater. Res. Express 8 (2021) 015201.
- [14] H.Scholze, « Le verre : nature, structure et propriétés », deuxième édition Institut du verre, Paris, 1980.
- [15] M. Gonon, S.Satha, T. Zanin, H. Satha, S. Abdelwaheb, $Sr_2TiSi_2O_8$ (STS) Polar Glass-Ceramics: Effet of Na_2O and CaO Additions in the parent Glass on the Crystallization Mechanism and on the Piezoelectric Properties, Ceramics, 2023.
- [16] Documentation interne MFG.
- [17] J.Grynberg, Thèse de doctorat « Mécanismes physiques et chimiques SiO_2 - Na_2CO_3 », Université Pierre et Marie Curie, 2012.
- [18] Y.Hafsi, S.Meftah, Mémoire fin d'étude « Optimisation des paramètres de bain d'étain et de l'étenderie », Ecole supérieure des mine et des métallurgies Amar Laaskri Annaba, Juillet 2021.
- [19] P.Gérard, une petite encyclopédie du verre, « L'élaboration du verre ». Octobre 2007.

Références Bibliographiques

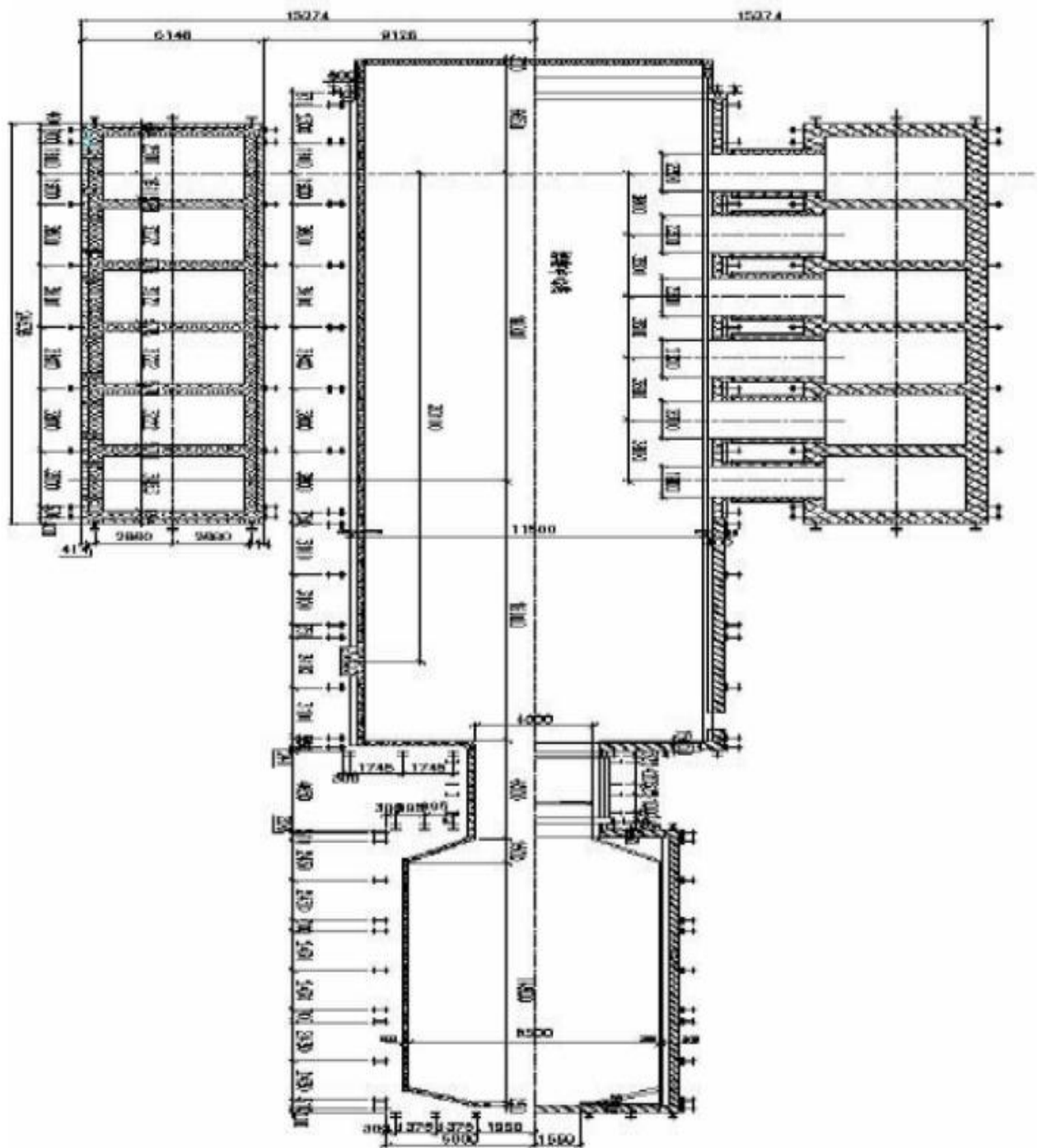
- [20] L.Massard, Thèse de doctorat « Etude de fluage de réfractaires électrofondues du système Alumine- Zircone- Silice », Ecole des mines de Paris, 5 décembre 2005.
- [21] N. Sebai, Formation interne MFG.
- [22] Pilkington Brothers Limited, St Helens Lancashire, « The float glass process », Grande – Bretagne, 1969.
- [23] E.Lataste, Thèse « Comportement mécanique et endommagement de réfractaire électrofondues sous sollicitation thermomécanique », Ecole doctorale matériaux Lyon, 12 décembre 2005.
- [24] Y.Surrel, « Contrôle de défauts d'aspect et de qualité de surface », Avril 2006.
- [25] Manuel de diagnostic et de résolution de défauts du verre flottant de 600 T/J de l'industrie verrière MFG.
- [26] B.Izmirlioglu, S.Yilmaz, « Fours de fusion du verre réfractaires et défauts réfractaires », Centre scientifique et technologique de Siscam, 15 mai 2015.



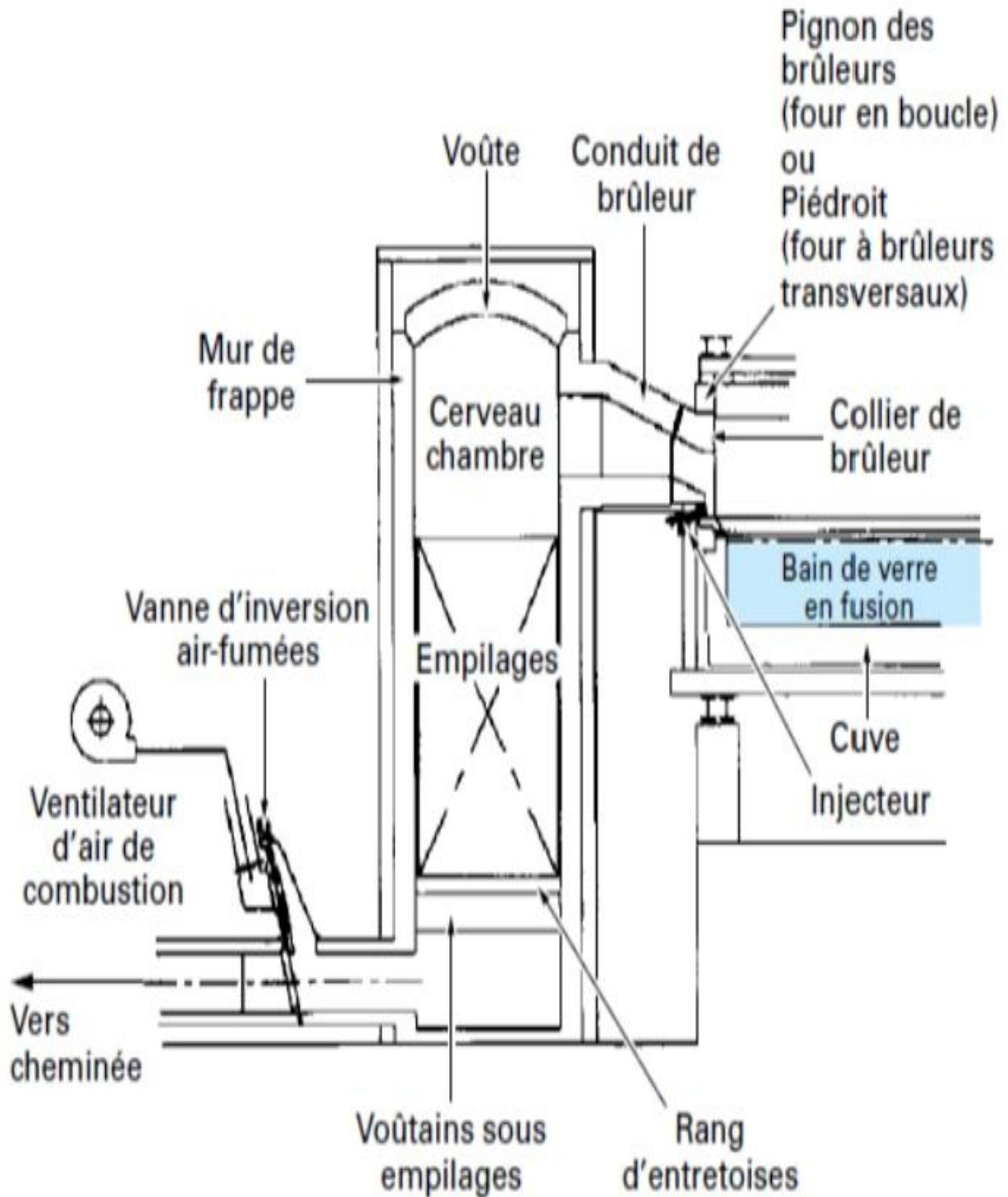
Les

annexes

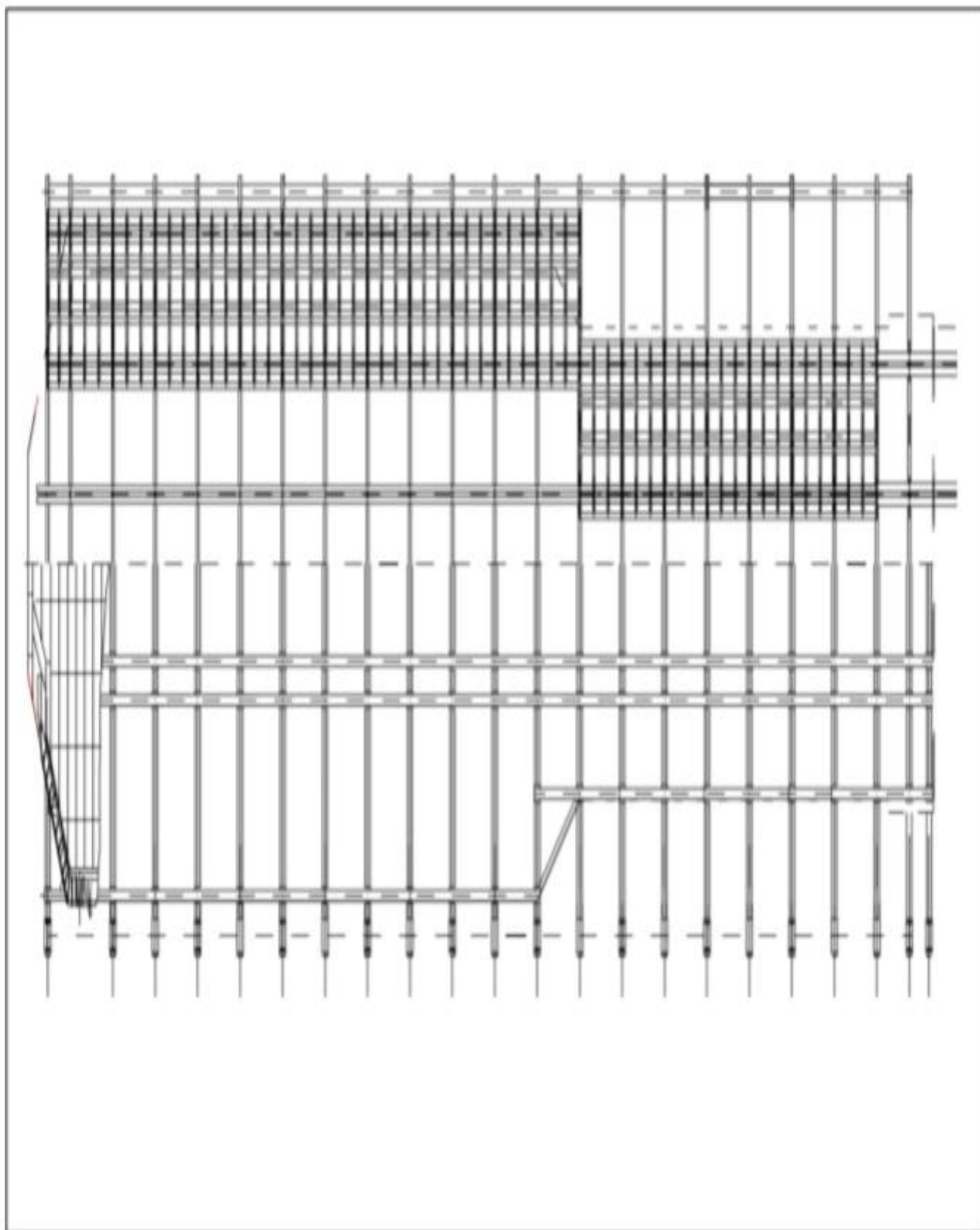
Annexe n°01: Plan de dimension du four de fusion.



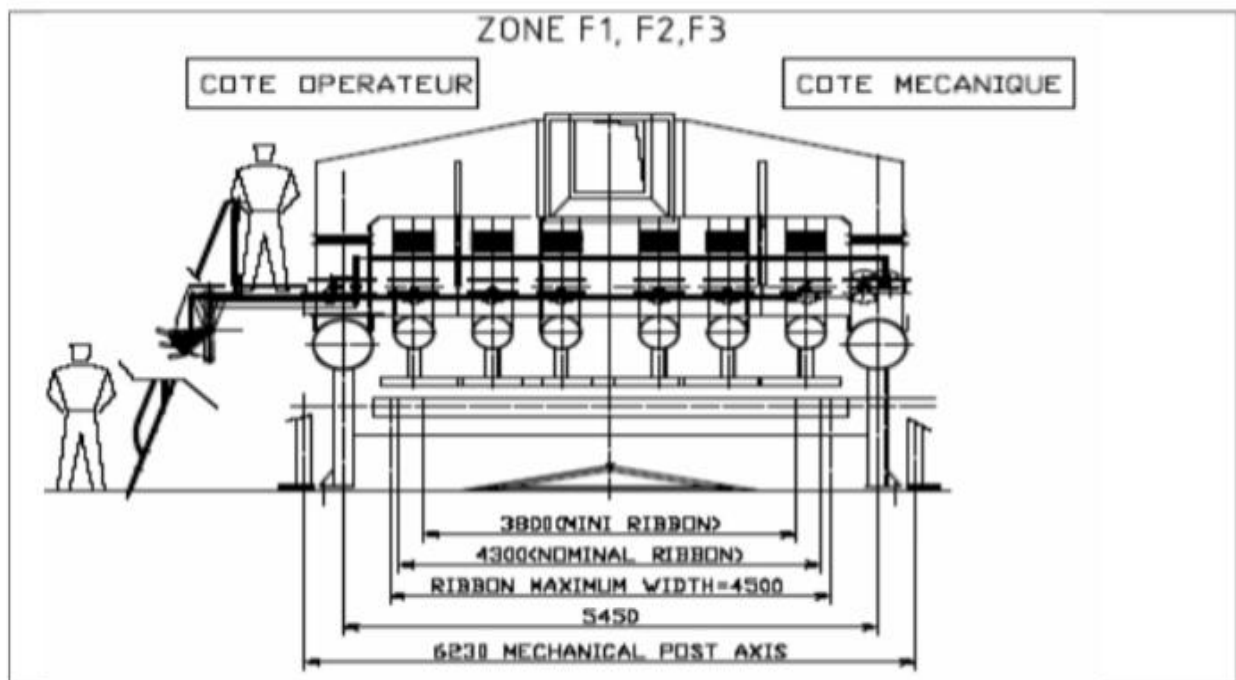
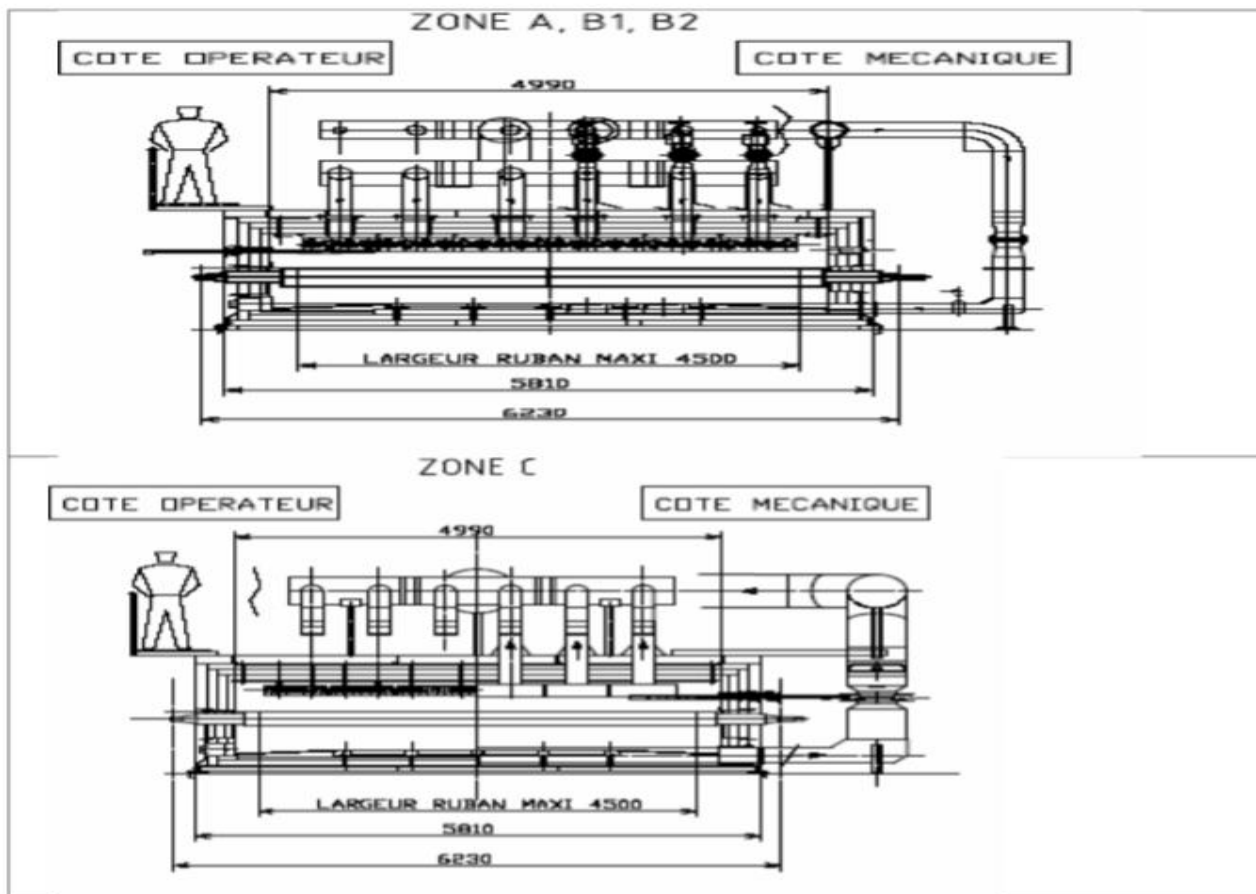
Annexe n°02: Chambre de régénérateur.



Annexe n°03: Le vue en plan du bain d'étain.



Annexe n°04: Coupe transversale des zones A, B1, B2, C, F2, F3 sur l'étenderie.





Présentation

de

l'entreprise

MFG

I- Présentation de l'entreprise Mediterranean Float Glass (lieu de stage)

Mediterranean Float Glass est une filiale du groupe CEVITAL, créée en 2007 et spécialisée dans la production et la transformation de verre plat. Elle considère aujourd'hui parmi les principales entreprises africaines de production de verre, la seule dans l'ensemble du Maghreb et le premier producteur de verre flotté de lux en Afrique avec un investissement total dépassant 300 millions d'euros.

Son siège à L'Arbaa, province de Blida, sa production totale de verre équivaut à 1400 tonnes par jour, faisant de l'Algérie un pays qui importe 100 % de verre plat vers un pays exportateur. 70% de la production de l'entreprise est orientée vers l'exportation vers l'Europe, l'Afrique et l'Amérique du sud.

L'entreprise occupe plus de 90% des parts de marché en Algérie, 90% en Tunisie, 60% au Maroc et en France, Espagne, Portugal, Turquie, Brésil, Angola et autres.

L'entreprise emploie plus de 900 travailleurs directs et 10000 indirectement, aujourd'hui MFG produit du verre 100% algérien et s'approvisionne entièrement en matière premières à partir du marché local, ses ressources humaines sont constituées de talents 100% algériens.

L'entreprise dispose d'une centrale électrique qui garantit une totale indépendance dans la fourniture d'énergie électrique.

MFG produit plusieurs types de verres notamment le verre clair, le plat, le feuilleté, à couche tendre. L'entreprise aspire à maintenir les normes les plus élevées en matière de qualité et d'excellence en favorisant l'innovation, en développant des partenariats solides, en agissant de manière responsable sur le plan environnemental et social, en pour suivant croissance sur le marché national et international et en valorisant employés. Elle dispose aujourd'hui de 5 lignes de production et d'une unité de transformation.

II- Caractéristiques principales

Superficie du terrain : 30 hectares.

Longueur du linge : 844 mètres.

Station d'électricité personnelle : 16000MVA.

Station de gaz naturel : 16000 m³/h.

Station d'épuration d'eau : 140m³/h.

Station de fabrication d'hydrogène H₂ : 130m³/h.

Station de fabrication d'azote nitrogène N₂ : 1600m³/h.

Cout global : 57M.USD.

III- La durabilité de l'entreprise

Pour garantir la performance de sa gestion en matière de santé, sécurité, environnement et qualité, MFG fait certifier ses activités depuis de nombreuses années par des organismes reconnus internationalement. Ainsi, le verre est fabriqué conformément à des standards de production audités régulièrement. MFG a obtenu pour son complexe industriel les certifications suivant :

- ISO 9001 pour sa gestion de la qualité.
- ISO 14001 pour sa gestion environnementale.
- OSHAS 18001 pour la santé et la sécurité de ses employés.

IV- Les unités de production

- Unité de verre Float 1600 T/j.
- Unité de verre feuilleté 400 T/j.
- Unité de transformation des produits verriers.
- Unité de verre à couches tendres 300 T/j.
- Unité de verre Float 2800 T/j.
- Unité de verre électroménager.