REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE POPULAIRE

MONISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES MEDEA



Faculté de technologie

Département de génie des procédés et environnement

En vue l'obtention du diplôme de master en génie des procédé

Projet fin de cycle

Filière : génie de matériaux

Thème :

Etude les paramètres de production et les défauts de verre de 3 mm et proposées des solutions pour augmenter le rendement.

Présenter par :

- LARIBI Khaled
- ZAOUI Abderrahmane

Proposé et diriger par :

- FERHAT Samira
- SEBAI Noureddine

Année universitaire 2020 - 2021

DEDICACES

Avant tous, je dédie ce modeste travail

A mes parents, qui m'ont apporté leur soutien et m'ont voué un amour inconditionnel. Vous êtes pour moi un exemple d'honnêteté, de simplicité et de sacrifice continu. En espérant que ce modeste travail témoigne de mon affection et mon éternelle gratitude,

A mes très chers frères, mes sœurs et a tout ma famille,

A mon encadreur, Mme Ferhat, pour l'encouragement qu'il ma donnée tout au long de la période de stage,

A mes amies, Abderrahmane, allaeddine, Ramzi, qui ont toujours été présent pour moi,

A tous qui mon encouragée de prés ou de loin pour pouvoir terminer ce modeste travail

A toute la promotion génie des procédés des matériaux

« Que dieu tout puisant l'accorde dans son vaste paradis»

Khaled

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents

L’hommage ne peut pas être à la hauteur de l’amour dont ils ne cessent de me remplir

Dieu leur donné une bonne santé et une longe vie

A mon oncle Amr que j’aime tant et qui m’a soutenu tout au long de ce projet

Et bien sur pour mes frères, sans oublier ma grand-mère, qui a toujours prié dieu pour moi.

A toute ma famille Zaoui et Rakkach.

A mon binôme Khaled et a toute la famille Laribi.

A mes amis Allaeddine, Ramzi, Abdellah, et tous ceux qui ont contribué de prés ou loin a la réussite de ce projet, je peux vous dire merci.

Abderrahmane

Remerciements :

Avant toute chose, merci Dieu tout puissant de m'avoir donné la patience, le courage, la santé durant mon parcours pédagogique pour mener à terme ce

Travail.

Je voudrai adresser mes vifs remerciements à mon encadreur,

Mme Ferhat qui a accepté de me suivre pendant la période de mon stage. Pour les nombreux sacrifices qu'elle a consentis de faire, afin de mener à bien le présent travail, avec tout le professionnalisme dont on connait d'elle. Je lui adresse le témoignage de toute ma reconnaissance.

J'adresse tous mes remerciements aux membres du jury.

Je tiens aussi à remercier les enseignants qui ont veillé à notre formation tout au long de notre cursus universitaire au sein de l'Université Yahia Fares, ainsi que tout le personnel administratif.

Un grand remerciement à monsieur Sebaï Nourddine, chef de ligne de production de verre plat en MFG, et mon maitre du stage qui m'a formé et accompagné tout au long de ce mémoire avec beaucoup de patience et de pédagogie.

Merci également à Mr. Darraji Nabil Toufik qui a témoigné un intérêt tout particulier pour mon travail. Un remerciement spécial aux personnels du laboratoire.

Je voudrai les remercier pour l'accueil qu'ils m'ont fait au sein du laboratoire central. A tous les employés et cadres de l'entreprise MFG qui, sans leur dé-

vouement, ce travail n'aurait pas pu voir le jour ; Mr. Hamid, Mr. Mohamed, Mr.zahir, Mr. Mouloud pour la gentillesse et le sens du partage. Je voudrai simplement leur dire merci.

Un sincère remerciement à tous les amis au sein de l'Université Yahia Fares pour leur soutien et les bons moments qu'on a partagé ces dernières années.

Je n'oublie pas ma famille : ma mère et mon père, mes frères et mes sœurs, pour leur présence, leur patience et leur soutien tout au long de mes études.

A toutes les personnes que j'aurais pu omettre de citer et qui ont contribué, de près ou de loin, à l'achèvement de mon travail, je dis merci.

Liste des figures

CHAPITRE PREMIER : ETUDE BIBLIGRAPHIQUE

N° figure	Titre	N° page
1	Organigramme générale du MFG.	5
2	Représentation bidimensionnelle de a)la structure de la silice cristalline et b) d'un verre silicaté selon Zachariasen.	7
3	Genèse de l'état vitreux.	8
4	Représentation schématique de la structure de verre de silice.	9
5	la courbe de dilatation thermique en fonction de la température.	23
6	Indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde.	24

CHAPITRE DEUXIEME : DIFFERENTES TECHNIQUES DE FABRI-CATION DU VERRE PLAT

N° figure	Titre	N° page
7	Procédés FOURCAULT .	32
8	Schéma de précédés de laminage.	33
9	Schéma de procédés de verre plat flotté.	33

CHAPITRE TROISIEME : MATERIELS ET METHODES

N° figure	Titre	N° page
10	Schéma du procédé float .	37
11	Principe de fonctionnement d'une paire de régénérateurs.	38
12	Épaisseur d'équilibre d'une feuille de verre flotté.	38
13	Résistances électriques du bain d'étain.	39
14	Top Roll en contact avec le ruban du verre.	39
15	L`étenderie de la float line.	40
16	Ligne de découpe.	41

CHAPITRE QUATRIEME : ETUDE LES PARAMETRES DE PRODUCTION ET LES DEFAUTS DE VERRE DE 3 MM ET SOLUTIONS PROPOSEES POUR AUGMENTER LE RENDEMENT.

N° figure	Titre	N° page
17	Température d'étain/verre et puissances électriques.	**46**
18	la courbe d'épaisseur de 32 points.	**47**
19	ruban du verre et formation d'épaisseur.	**48**
20	refroidisseur actuellement utilisé	**49**
21	refroidisseur proposé.	**49**
22	Génération des bords non-conformes lors du formage et leur élimination lors de la découpe.	**50**
23	mollette conforme	**54**
24	mollette usée, logis dégradé	**54**
25	production stockée en vrac et emballée	**56**
26	évacuation et commercialisation de PLF	**56**
27	stockage en vrac de caisses DDLF	**57**
28	structure de microscope optique	**60**

Liste des tableaux

CHAPITRE PREMIER : ETUDE BIBLIGRAPHIQUE

N° tableau	Titre	N° page
1	composition chimique de quelques verres industriels.	**11**
2	Les différents produits verriers.	**12**
3	Valeurs de viscosité pour les différents régimes d'élaboration et de traitement du verre selon PAVLOUCHKINE.	**15**

CHAPITRE TROISIEME : MATERIELS ET METHODES

N° tableau	Titre	N° page
4	différents formats de la feuille fabriquée du verre.	**41**

CHAPITRE QUATRIEME : ETUDE LES PARAMETRES DE PRODUCTION ET LES DEFAUTS DE VERRE DE 3 MM ET SOLUTIONS PROPOSEES POUR AUGMENTER LE RENDEMENT.

N° tableau	Titre	N° page
5	Les paramètres d'épaisseur	**46**
6	Tableau global des pertes de production pour la compagne de 3 mm.	**49**

Nomenclateur et Abréviation

MFG: Mediterranean Float Glass.

Lb: Largeur brute.

Ln : Largeur nette.

Lbd : Largeur bord droit.

Lbg : Largeur bord gauche.

Lbd : Longueur bord droit.

Lbg : Longueur bord gauche.

Pbd : Poids bord droit.

Pbg : Poids bord gauche.

E_{moy} : épaisseur moyenne.

V_e : vitesse d'entrainement principale.

TRs : Top Rolles.

TABLE DES MATIERES Page

Dédicace…….
Remerciement……
Liste des figures ……
Liste des tableaux ……
Nomenclateur et Abréviation……
Résumé ……
Introduction ……..……1

CHAPITRE PREMIER : ETUDE BIBLIGRAPHIQUE

I. PRESENTATION DU LIEU DU STAGE ……3
1. Localisation ……..3
2. Les effectifs de MFG …….....3
3. Développement ……3
4. Distribution ……...4
5. Organisation structurelle de MFG ……4

II. HISTORIQUE DU VERRE ……..5
1. Qu'est-ce qu'un verre ……..6
2. Définition du verre ……..7
3. La transition vitreuse ……..7
4. Structure du verre ……8
4.1.Oxydes formateurs ……...8
4.2.Oxydes modificateurs ……..9
4.3.Oxydes intermédiaires ……9
5. Composition du verre ……....10
6. Type des verres ……..11
6.1. Le verre plat ……11
6.2. Le verre creux ……..11
6.3. Les fibres de verre ……...…12
7. Les verres techniques et les verres spéciaux ……13
7.1. Verres techniques ……...…13
7.2. Verres spéciaux ……...…13
7.2.1. Verres d'oxydes lourds ……...13
7.2.2. Verres fluorés ……13

7.2.3. Verres de chalcogénures ……14

8. Propriétés du verre ……14
8.1. Propriétés rhéologiques ……...…14
8.1.1. La viscosité du verre ……..14
8.1.2. Dépendance de la viscosité ……...…….15
a. Influence de la température ……15
b. La tension superficielle ……..16
c. Influence de la composition ……..16

8.2. Propriétés mécaniques ……...…….17
8.2.1. La dureté ……17
8.2.2. Résistance à la traction et résistance à la compression……..17
8.2.3. Dureté superficielle ……..18
a. Résistance à la traction ……...18
b. Résistance à la flexion ……18
c. Caractéristiques mécaniques ……...19

8.3. Propriétés thermiques ……20
8.3.1. Chaleur spécifique ……..…20
8.3.2. Dépendance de la chaleur spécifique ……20
a. Influence de la température ……...……...20
b. Influence de la composition chimique ……..21
c. Conductibilité thermique ……..21
d. Dilatation thermique……..22

8.4. Propriétés optiques du verre ……...23
8.4.1. Réfraction ……23
a. Influence de la composition ……..……25
b. Influence de la température ……...……25
c. Transmission optique ……...….25
c.1.Facteur de transmission T ……..….26
c.2.facteur d'absorption A……...….26
c.3.facteur de réflexion …… ……..26

8.5. Propriétés électriques ……..……26
8.5.1. Dépendance de la composition ……..…..27
8.5.2. Influence de la température ……...…..27

8.6. Propriétés chimiques ……..…… 28

CHAPITRE DEUXIEME : DIFFERENTES TECHNIQUES DE FABRICATION DU VERRE PLAT

I. Développement du verre plat ……..31
1. Verre plat soufflé ……31
1.1. La technique du verre soufflé en manchon ……....31
1.2. La technique du verre soufflé en plateau ……...…31
2. Verre plat étiré ……....31
3. Verre plat laminé ……..…32
4. Verre plat flotté ……...33

CHAPITRE TROISIEME : MATERIELS ET METHODES

I. LA MATIERE PREMIERE UTILISEE POUR LA FABRICATION DU VERRE……..35
1. Sable (SiO_2) ……....35
2. Carbonate de soude (Na_2CO_3) ……...….35
3. Dolomie ($CaMg(CO_3)_2$) ……..…35
4. Calcaire ($CaCO_3$) ……35
5. Feldspath [$(K,Na)AlSi_3O_8$] ……....35
6. Sulfate de sodium (Na_2SO_4) ……..35
7. Charbon ……36
8. Oxyde de fer ……..…36
9. Calcin ……...36

II. LES ETAPES DE FABRICATION DU VERRE PLAT FLOAT ……..36
1. Enfournement des matières premières ……37
2. Fusion ……..……37
3. Formage (bain d'étain) ……..…….38
4. Recuit ……..40
5. Découpe ……..41
6. Contrôle qualité et stockage ……...42

CHAPITRE QUATRIEME : ETUDE LES PARAMETRES DE PRODUCTION ET LES DEFAUTS DE VERRE DE 3 MM ET SOLUTIONS PROPOSEES POUR AUGMENTER LE RENDEMENT.

I. APERÇU SUR L'OBJECTIF DU TRAVAIL ……..…44

II. PRINCIPE D'OBTENTION DES EPAISSEURS AU NIVEAU DU BAIN D'ETAIN ……..44
1. La vitesse ……...…..44
2. L'angle ……45
3. La pénétration ……..45
4. L'impression ……...45
5. Le nombre de Top Rolls ……45

III. PROBLEMATIQUE ……46
1. Causes de la forme non uniforme de l'épaisseur et solutions proposées …….47
2. Etude des pertes de production en campagne de 3mm ……49
2.1. Pertes de qualité ……...50
2.2. Pertes de bord ……..50
2.2.1. Calcul de la tirée brute par la méthode de pesage des bords…….51

3. Analyse des pertes……....53
3.1. Pertes dues au déclassement du produit fini ……..…..53
3.1.1. Pertes dues à la mauvaise découpe ……....…….54
3.1.2. Pertes dues au manque de poudre intercalaire ……..….54
3.2. Pertes de saturation ……..……55
3.3. Pertes dues aux problèmes de maintenance ……57
3.4. Pertes dues aux casses ……57
3.5. Pertes dues aux prélèvements ……58

IV. RECOMMANDATIONS GLOBALES ……58

V. LES DEFAUTS DU VERRE FLOAT ……...…60
1. Méthode d'analyse au microscope électronique ……..60
2. Définition d'un défaut de verre ……...60

3. Types des défauts du verre float ……..…61
3.1. Défaut d'aspect ……61
3.2. Défaut ponctuel ……...……61
3.3. Pierres (inclusions solides) ……..61
3.4. Tâches ……..61
3.5. Les défauts linéaires ou étendus ……...…..62
3.6. Défaut optique ……..……..62

4. Les causes probables et les actions correctives de chaque défaut…….…..62
4.1. Les bulles ……..…… 62

4.1.1. Les causes probables ……62
4.1.2. Les actions correctives ……62

4.2. Pierre de Quart ……63
4.2.1. Les causes probables ……63
4.2.2. Les actions correctives ……63

4.3. Pierre de Corindon ……63
4.3.1. Les causes probables ……63
4.3.2. Les actions correctives ……63

4.4. Pierre de Diopside ……63
4.4.1. Les causes probables ……63
4.4.2. Les actions correctives ……64

4.5. Pierre d'Oxyde d'Etain ……64
4.5.1. Les causes probables ……64
4.5.2. Les actions correctives ……64

4.6. Pierre d'étain ……64
4.6.1. Les causes probables ……64
4.6.2. Les actions correctives ……64

4.7. Pierre de Slice réfractaire ……65
4.7.1. Les causes probables ……65
4.7.2. Les actions correctives ……65

4.8. Résultats de test par microscope ……65

VI. CONCLUSION GENERALE ……67

VII. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ……69

Résumé :

Il est clair que l'intérêt d'une entreprise est d'augmenter les rendements et les ventes.

Dans le process du float, il est plus facile de maitriser les techniques de fabrications de certaines épaisseurs par rapport à d'autres. C'est le cas du 3mm. Les rendements actuels sont très nettement inférieurs au 6mm et 5mm, 70% contre 87% de rendement respectivement.

Notre travail vise à apporter un regard neuf sur les paramètres influençant l'augmentation des rendements lors de la fabrication du verre mince et de donner des recommandations objectives et des pistes d'amélioration exploitables. Même si le sujet est très nettement délimité, le champ de recherche, reste à lui, toujours ouvert.

Un des points qu'on doit aborder en premier est la courbe de l'épaisseur qui a une forme anormale même si c'est conforme par rapport la norme.
En second lieu, nous allons traiter et analyser les pertes et les défauts liées à la fabrication du verre de 3mm et de déduire les pistes d'amélioration afin de d'arriver à notre objectif qui est l'augmentation du rendement et par conséquent, l'augmentation du bénéfice de l'entreprise.

Les mots clés :

Rendements – verre mince – courbe d'épaisseur – les pertes – les défauts – fabrication de verre.

Abstract:

It is clear that the interest of a company is to increase yields and sales.

In the float process, it is easier to master the manufacturing techniques of certain thicknesses compared to others. This is the case for 3mm. The current yields are much lower than 6mm and 5mm, 70% against 87% respectively.

Our work aims to bring a new look on the parameters influencing the increase of the yields during the manufacture of thin glass and to give objective recommendations and exploitable ways of improvement. Even if the subject is very clearly delimited, the field of research, remains to him, always open.

One of the points which we must approach in first is the curve of the thickness which has an abnormal form even if it is in conformity compared to the standard.Secondly, we will treat and analyze the losses and the defects related to the manufacture of the glass of 3mm and to deduce the tracks of improvement in order to arrive at our objective which is the increase of the output and consequently, the increase of the profit of the company.

Key words:

Yields - thin glass - thickness curve - losses - defects - glass manufacturing.

ملخص:

من الواضح أن المصلحة الفضلى للشركة هي زيادة العوائد والمبيعات.في عملية التعويم ، من الأسهل إتقان تقنيات التصنيع ذات السماكات المحددة مقارنة بالآخرين. هذا هو الحال مع 3 مم. الإنتاجية الحالية أقل بكثير من 6 مم و 5 مم، 70٪ مقابل 87٪ على التوالي.

يهدف عملنا إلى إلقاء نظرة جديدة على المعايير التي تؤثر على زيادة الغلة أثناء تصنيع الزجاج الرقيق وتقديم توصيات موضوعية وسبل قابلة للتنفيذ للتحسين. حتى لو كان الموضوع محددًا بوضوح شديد ، يظل مجال البحث مفتوحًا دائمًا.

إحدى النقاط التي يجب معالجتها أولاً هي منحنى السُمك الذي له شكل غير طبيعي على الرغم من أنه يتوافق مع المعيار. في المقام الثاني ، سنقوم بمعالجة وتحليل الخسائر والعيوب المتعلقة بتصنيع الزجاج 3 مم واستنتاج سبل التحسين من أجل الوصول إلى هدفنا وهو زيادة العائد وبالتالي زيادة العائد. زيادة أرباح الشركة.

الكلمات المفتاحية :

المردود- الزجاج الرقيق - منحنى السمك - الخسائر - العيوب - صناعة الزجاج.

Introduction

L'installation d'une usine de fabrication a pour but de produire le maximum de produit conforme à moindre coût. Cette règle n'est pas exclue pour la fabrication du verre plat. Vu que le rendement de production est assez acceptable pour les épaisseurs de 4mm et plus, soit en moyenne 86%, celui de la fabrication de 3mm est loin d'être satisfaisant avec une moyenne inférieure à 80% par campagne. MFG, fait plusieurs études et actions afin d'augmenter ce rendement.

C'est dans ce contexte que ce travail a été mené dans le but d'avoir un regard neuf et déceler les parties oubliées par l'effectif exerçant dans la production. Il vise à étudier les paramètres de production et analyser les pertes afin d'améliorer les rendements lors de production du 3mm.

Ce mémoire de thèse est composé de quatre parties : la première partie jusqu'à la troisième partie se focalise sur la partie théorique pour la fabrication du verre, principalement le verre plat par flottage à l'usine de MFG.

La quatrième partie présente une introduction à la problématique du mémoire et décrit le contexte général dans lequel ce travail est situé. Elle est répartie sur trois axes principaux : le premier consiste à l'étude des paramètres de production et à l'analyse des pertes lors de la fabrication ainsi qu'à élaborer les solutions possibles concernant l'amélioration du rendement lors de la production de 3mm ainsi que l'aspect financier et économique du gain, Cependant, le second axe consiste les défauts de verre, il contient du déférents type, il y'a des causes probables et des actions correctives.

Finalement une conclusion générale et des recommandations.

CHAPITRE PREMIER

ETUDE BIBLIGRAPHIQUE

CHAPITRE PREMIER : ETUDE BIBLIGRAPHIQUE

I. PRESENTATION DU LIEU DU STAGE

Mediterranean Float Glass par abréviation (MFG) est créé en avril 2007, mais y'est inaugurée le 28 mai 2007. C'est une filiale du groupe CEVITAL, premier groupe industriel privé en Algérie. Elle est la plus grande ligne de production en Afrique et l'unique producteur du verre plat au niveau maghrébin, d'une capacité de 600 tonnes par jour pour la première ligne du verre float, et 800 tonnes par jour pour la deuxième. Depuis septembre 2007, l'entreprise travaille en continu dans un système d'équipes de rotation (3*8) pour atteindre une production de 14.000 tonnes/jour.

1. Localisation

Le complexe est implanté au niveau du site de l'Arabaa dans la wilaya de Blida et a nécessité un investissement de 100 Million d'Euros. L'usine fait partie d'un grand projet constitué de 3 lignes de verre plat d'une capacité totale de 642 400 tonnes par an. MFG profite d'une parfaite localisation au niveau du site de l'Arabaa, à 30 km d'Alger ce qui représente moins d'une heure de route de l'aéroport internationale et du port d'Alger.

2. Les effectifs de MFG

MFG compte actuellement plus de 830 salariés, qui mettent en pratique leurs compétences dans différents métiers afin de fournir un produit de choix et un service de qualité.

3. Développement

MFG a mis en place trois autres lignes de production de verre :

- En Décembre 2009 : une ligne de verre feuilleté.
- Le mois de Septembre 2011 : une ligne de verre à couches tendres.
- Le début Octobre 2010, MFG a mis en place une unité de transformation des produits verriers pour couvrir le marché algérien, notamment, en double vitrage isolant destiné aux fenêtres et aux façades des bâtiments.
- En 2015, inauguration de la 2ème ligne de production du verre plat et une unité de verre électroménager.

MFG répond aussi aux besoins de plusieurs secteurs économiques tels que le BTP, l'électroménager, l'énergie, les panneaux solaires, le mobilier urbain et domestique. Depuis 2008, MFG a un système de management intégré QHSE et est certifiée sous trois référentiels :

- ISO 9001 : pour la qualité en 2008
- ISO 14001 : pour l'environnement en 2004.
- OHSAS 18001: pour la santé et la sécurité de ses employés en 2007.
- ISO 9001: pour le management des projets en 2011.

4. Distribution

MFG exporte 70% de sa production essentiellement en Europe occidentale tel que l'Italie (Turin), l'Espagne (Valence), la France, et le Portugal ; Mais aussi vers la Tunisie (Tunis), le Maroc (Tanger) et d'autre pays. Depuis 2007, MFG a fait passer l'Algérie, de pays quasi importateur à celui d'exportateur en matière de verre. Les 30% restants, suffisent largement à combler les besoins du marché national.

5. Organisation structurelle de MFG

La figure 1 permet de visualiser les différents organes qui composent l'entreprise, le lien existant entre les différentes structures ainsi que la hiérarchie existante au sein de cette société.

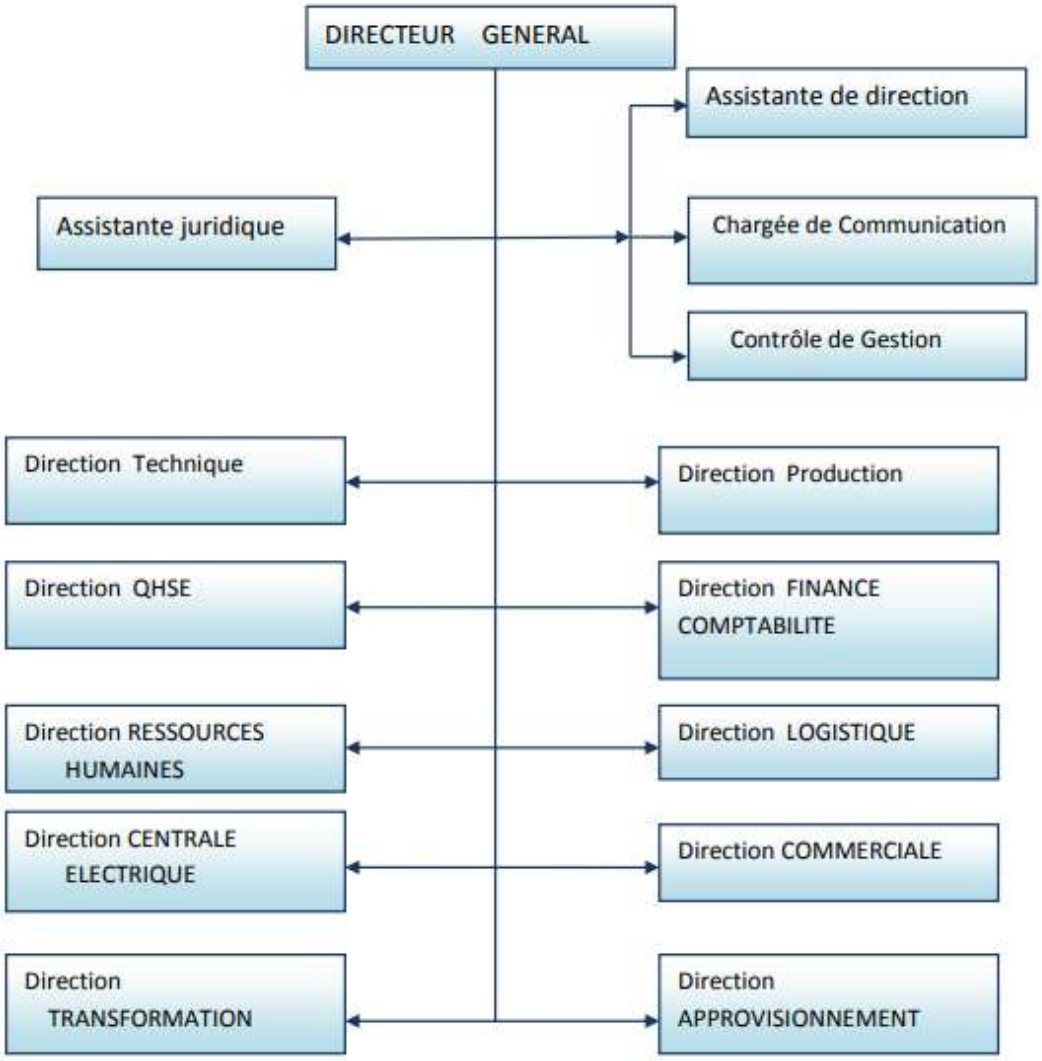


Figure 1 : Organigramme générale du MFG.

II. HISTORIQUE DU VERRE

Le verre existe déjà naturellement depuis plusieurs centaines de milliers d'années. L'homme du préhistorique l'utilisa, pour la première fois, il y a 100 000 ans sous forme d'obsidienne (verre naturel d'origine éruptive). Après sa découverte, il s'est familiarisé avec ce matériaux et a promotionné son utilisation dans tous les domaines, pour fabriquer des outils, des armes coupantes et des bijoux [1]. Les premiers verres fabriqués par l'homme sont originaires de Mésopotamie, de Syrie puis d'Égypte, des potiers Egyptiens ont fabriqué le premier verre tout à fait, par accident, en cuisant leurs poteries. Le premier verre était un émail, mélange de sable et d'autres

minéraux fondus sur la surface d'objets en céramique. Il y a trois mille ans, des artisans découvrirent que si l'émail avait une épaisseur suffisante, il pouvait servir seul à fabriquer des objets sans pour autant qu'il soit supporté par la terre cuite. Ils ne sont pas encore transparents ou translucides mais opaques, de couleur verte ou bleue. Le verre transparent a été découvert à Sidon (Phénicie), probablement à cause de la pureté des sables de la région [2]. En Ve et Xe siècle est apparue la fabrication de verre plat soufflé, cette fabrication se faisait par deux techniques à savoir :

- Le soufflage en couronne :

Produit dans l'Ouest de la France et en Angleterre où sa production dura jusqu'au XIXe siècle. Le verre plat ne prit son essor qu'à partir de l'invention de ce nouveau procédé. Il s'agit d'abord d'un vase soufflé à fond plat, que l'on fait ensuite tourner face à l'ouverture d'un four.

Le soufflage en manchon : Produit dans l'Est de la France et en Europe centrale. C'est un cylindre de verre obtenu par l'allongement de la paraison cueillie par le verrier, puis fendu, ramolli et aplati. Ces procédés furent utilisés durant tout le moyen âge pour la fabrication des vitraux.

1. Qu'est-ce qu'un verre

Les solides sont caractérisés à la fois par leur incapacité à prendre la forme du récipient dans lequel ils prennent place, et par leur grande résistance aux forces de cisaillement. On les classe en deux catégories : les solides cristallisés et les solides amorphes, qu'on appelle aussi parfois désordonnés ou non-cristallisés. Un solide cristallisé est constitué de cristaux dont l'arrangement des atomes, périodique dans l'espace, répond à des règles précises.

Dans un solide amorphe au contraire, l'arrangement des atomes, observé par diffraction X, est aussi désordonné que dans un liquide. L'ordre à longue distance qu'on trouve dans les cristaux n'existe plus. Il n'y a qu'un ordre à l'échelle de la distance interatomique. Par suite de leurs modes d'obtention, les solides amorphes sont caractérisés par une énergie interne en excès par rapport aux autres états de la matière, si bien que si on les chauffe, ils subissent naturellement une transformation qui apparaît avant que la température de fusion ne soit atteinte. Pour certains solides amorphes, cette transformation est un passage spontané plus ou moins violent vers l'état cristallisé. Un exemple parfois cité concerne les éléments en graphite des centrales nucléaires [3] qui contiennent souvent du thorium. Le rayonnement β émis par cet élément provoque, au bout d'un certain temps de fonctionnement, l'amorphisation du graphite. Un traitement thermique

ultérieur permet alors la recristallisation du graphite. Mais pour la catégorie importante de solides amorphes qu'on appelle verres, la cristallisation est toujours précédée de la transition vitreuse, qui est le passage de l'état solide à l'état de liquide visqueux.

2. Définition du verre

La plupart des scientifiques considèrent le terme "verre" comme: « *Tous les solides non cristallins qui montrent une transition vitreuse* », quel que soit leur mode de fabrication [4]. Gustav Tammann [5] définit le verre comme suit: « *L'état vitreux est l'état figé d'un liquide en surfusion, qui se solidifie sans cristalliser* ». D'autres définitions ont été proposées par des sociétés et organisations de normalisation [6.7]. Donc, le verre est un solide amorphe, sans ordre à longue distance et sans périodicité dans l'arrangement des atomes (**figure 2**). C'est un matériau ou un alliage dur, fragile (cassant) et transparent au rayonnement. Le plus souvent, il est constitué d'oxyde de silicium (silice SiO_2) le constituant principal du sable et de fondants.

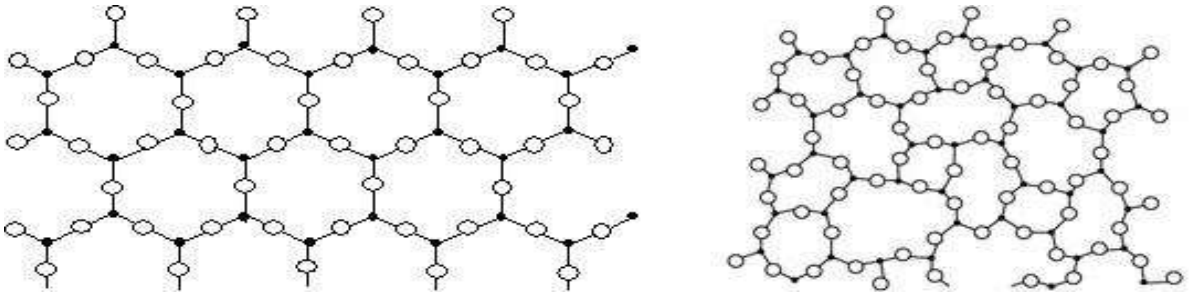


Figure 2 : Représentation bidimensionnelle de A) la structure de la silice cristalline et B) d'un verre silicaté selon Zachariasen.

3. La transition vitreuse

Le verre est un solide non cristallin présentant le phénomène de transition vitreuse. L'état physique correspondant est appelé l'état vitreux [8]. Le phénomène de transition vitreuse peut s'expliquer en suivant l'évolution d'une caractéristique physique du verre, comme son volume spécifique ou son enthalpie en fonction de la température. Dans le cas normal, il se produit à la température de fusion Tf une cristallisation accompagnée d'une diminution de volume brutale [9]. Si à Tf, il ne se produit aucune cristallisation, le volume continue de décroître en suivant la courbe d'équilibre en trait discontinu (**figure 3**).

Ce domaine du liquide surfondu se trouve donc encore en équilibre thermodynamique, lorsque la température diminue encore, la courbe s'infléchit pour suivre ensuite un tracé sensiblement parallèle à celui du cristal. Ce nouvel état hors d'équilibre thermodynamique apparaît à la température de transition vitreuse (T_g) et pour une viscosité constante, quelle que soit la composition du liquide $\eta_g = 10^{12}$ Pas. La transition vitreuse se produit à une viscosité d'autant plus élevée (à une température d'autant plus basse) que le refroidissement (ou le chauffage) est lent.

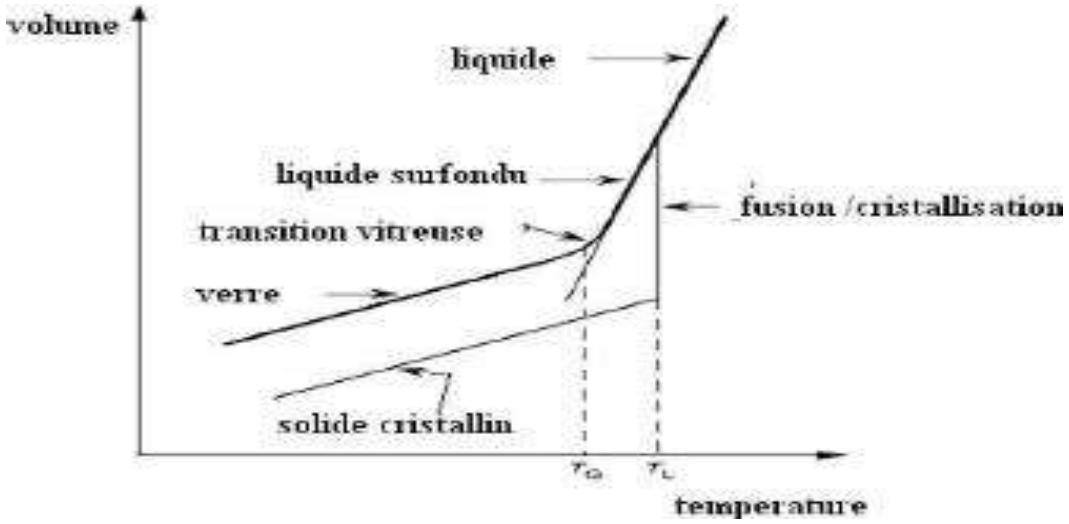


Figure 3 : Genèse de l'état vitreux.

4. Structure du verre

4.1.Oxydes formateurs

Les premiers travaux qui ont eu du succès pour classifier les matériaux en formateurs de verre et non formateurs ont été publiés par Zachariasen en 1932 [10]. Il a suggéré que seuls cinq oxydes peuvent former des verres tels que : SiO_2, GeO_2, B_2O_3, As_2O_3 et le P_2O_5. Chacun de ces cinq oxydes peut former seul un verre, comme il peut donner du verre avec un autre ou plusieurs autres oxydes, qui ne sont pas eux-mêmes des formateurs de verre. L'oxyde de silicium SiO_2 est le meilleur oxyde formateur dans l'industrie verrière car il se trouve abondamment dans la nature sous forme de sable (quartz). Les sables utilisés dans l'industrie verrière contiennent plus de 99% de SiO2 avec un taux d'impuretés inférieur à 0,2% [11]. Chaque molécule de silice est identique (tétraèdre) mais où l'organisation des unes et des autres est inexistante.

Cette fausse organisation se situe entre celle des solides (ordonnée donc cristallisée) et celles des liquides (en mouvement donc amorphe). L'état vitreux est cet état solide amorphe (non cristallisé) caractérisé par la distribution désordonnée des molécules, qui conservent néanmoins des distances fixes entre elles (**figure 4**).

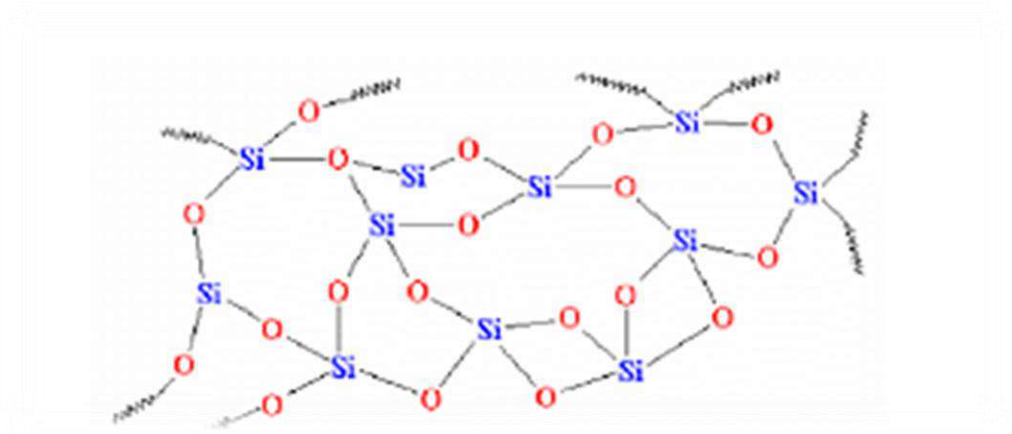


Figure 4 : Représentation schématique de la structure de verre de silice

4.2.Oxydes modificateurs

Les oxydes alcalins introduisent des discontinuités dans le réseau de silice et entraine une réduction de la viscosité [12]. Les oxydes alcalino-terreux sont aussi des modificateurs de réseau, mais ils sont plus réfractaires que les oxydes alcalins et donc favorisent moins à la formation vitreuse. Dans l'industrie verrière, pour abaisser de plusieurs centaines de degrés la température d'élaboration et de vitrification de la silice, des oxydes alcalins comme le sodium Na_2O et le potassium K_2O, appelés « soude » et « potasse », sont introduits sous forme de « fondants ». Une partie de Na_2O est introduite sous forme de sulfate: le sulfate de sodium se décompose à haute température libérant des bulles de SO_2 qui facilitent l'affinage. Le nitrate NO_3 est ajouté pour ses propriétés oxydantes. Le K_2O, plus cher, est utilisé dans les verres au plomb « cristal » et certains verres colorés. La chaux CaO est un composant important qui assure la stabilité des verres courants. Elle est introduite sous forme de carbonate de calcium, les calcaires, ou associée à la magnésie MgO dans la dolomie [10].

4.3.Oxydes intermédiaires

Ils peuvent jouer le rôle de formateur ou modificateur de réseau selon la composition du verre. Certains constituants sont ajoutés en très faibles quantités (1/100)

pour modifier les conditions d'élaboration ou la coloration du verre ou bien faciliter l'affinage.

5. Composition du verre

Le verre est un matériau inorganique, composé de nombreux oxydes, mais le plus souvent élaboré à partir de 3 constituants de base [13-14]:

- L'oxyde de silicium (SiO_2) ou silice, élément majoritaire, et véritable formateur du réseau vitreux
- L'oxyde de sodium (Na_2O), appelé fondant, provenant de la décomposition de carbonates synthétiques et qui va transformer la silice en silicate par attaque chimique
- L'oxyde de calcium (CaO), appelé stabilisant, issu de la décomposition de $CaCO_3$.

Pour de nombreux verres industriels (verre d'emballage et verre plat) ces 3 éléments représentent environ 95 % de leur composition pondérale, ce qui permet de définir le verre sur un plan chimique comme un silicate de sodium et de calcium.

En réalité l'oxyde de sodium est souvent accompagné d'oxyde de potassium (K_2O), et l'oxyde de calcium par l'oxyde de magnésium (MgO).

D'autres éléments, appelés additifs, sont ajoutés au verre pour apporter des propriétés bien spécifiques en fonction des applications envisagées:

- L'oxyde d'aluminium pour accroître la résistance hydrolytique.
- L'oxyde de plomb pour accroître la densité l'indice de réfraction et la brillance du verre
- L'oxyde de bore B_2O_3 formateur de réseau, comme la silice, mais apportant une plus grande stabilité thermique
- Les oxydes métalliques des éléments de transition (Fe_2O_3, Cr_2O_3, CoO, CuO, etc.) et certains lanthanides (CeO_2, Nd_2O_3…) pour colorer le verre ou le décolorer.
- Des additifs d'oxydoréduction pour ajuster le pouvoir redox du bain de fusion, ce paramètre jouant un rôle important sur la transmission du verre dans l'infrarouge et sur sa teinte finale, les plus utilisés sont le carbone pour son pouvoir réducteur, et l'oxyde de soufre (SO_3) obtenu par décomposition de sulfate de sodium, pour son pouvoir oxydant.

À titre d'exemple voici les compositions chimiques (en poids %) d'un verre courant utiliser pour la fabrication de bouteilles de champagne, du verre cristal pour la fabrication d'objets de luxe et d'un verre borosilicate très résistant chimiquement et thermiquement pour la pharmacie.

	Verre champagne	**Verre cristal**	**Verre borosilicate**
SiO_2	72	69,6	74,8
Al_2O_3	1,7		6,2
Cr_2O_3	0,2		
CaO	11	1,3	0,5
BaO			
MgO	1		
ZnO			
Na_2O	13,2	3,3	7,5
K_2O	0,4	10,9	0,8
B_2O_3			10,5
PbO		24,4	
SO_3	0,1		
Fe_2O3	0,3		

Tableau n°1 : Composition chimique de quelques verres industriels.

6. Type des verres

Les emplois du verre sont très variés, de l'utilisation quotidienne à la haute technologie. Ils donnent lieu à une production très importante.

6.1. Le verre plat

Les vitres étaient jadis fabriquées par étirage (procédé Pittsburgh), et les glaces par laminage, suivi d'un travail mécanique. Actuellement, on prépare les verres de vitrage par flottage sur un bain d'étain (procédé Pilkington). Le verre s'aplatit sur ce bain et peut présenter toutes les épaisseurs comprises entre 3 et 18mm.

6.2. Le verre creux

Sont utilisés pour fabriquer les bouteilles, les flacons, les tubes, les ampoules, les briques et les pavés. La composition du verre est différente suivant le produit fabriqué. Pour un contenant de produits alimentaires, on emploie un verre sodocalcique. Une quantité déterminée

de verre fondu est introduite dans un moule et pressée vers 400-450°C. Les moules sont en acier spécial et leurs surfaces souvent chromées. Les presses à main permettent de fabriquer jusqu'à 300 pièces/heure et les presses automatiques (comportent une série de moules) jusqu'à 1000 pièces/heure. Le procédé primitif de soufflage à la bouche, encore pratiqué dans la verrerie d'art ou scientifique a été mécanisé pour augmenter les rendements [15].

6.3. Les fibres de verre

Elles sont obtenues par l'étirage de verre fondu, jusqu'à ce qu'elle présente un diamètre compris entre 0,5 et 15 µm. Il est possible de fabriquer des fils longs, continus et multifilaires aussi bien que des fibres courtes de 25 à 30 cm de long. Tissées dans certains textiles, les fibres de verre constituent d'excellentes étoffes et de très bons matériaux d'ameublement grâce à leur stabilité chimique, leur solidité et leur résistance au feu et à l'eau. Les fibres de verre seules, ou associées à des résines, forment d'excellents isolants électriques. En imprégnant les fibres de verre de plastique, on obtient une fibre de verre mixte qui allie la solidité et l'inertie du verre à la résistance aux chocs du plastique. Parmi les procédés de fabrication des fibres de verres, il y a l'étirage mécanique à grande vitesse, la vitesse déterminant le diamètre des fibres qui est compris entre 1 et 8 µm. Ces fibres sont destinées à l'ameublement, au renforcement de matière plastique ou du caoutchouc, du plâtre, du papier, à l'isolement électrique ou à la fabrication de tissus industriels [16]. Le tableau N°2 résume les différents produits verriers utilisées dans des divers domaines.

PRODUITS DE BASE	PRODUITS DE BASE SPÉCIAUX	PRODUITS TRANSFORMÉS
• Float • Verre imprimé • Verre armé • Verre profilé • Verre étiré • Verre moulé • Verre soufflé	• Verre borosilicate • Vitrocéramiques • Verre à haute teneur en plomb	• Verre trempé thermiquement • Verre durci • Verre trempé chimiquement • Verre feuilleté • Verre à couches • Double vitrage • Verre bombé • Miroir Verres de décoration • Vitrages chromogènes

Tableau N°2: Les différents produits verriers.

7. Les verres techniques et les verres spéciaux

7.1. Verres techniques

Les matériaux vitreux qui font partie de notre quotidien (vitrage, flacons, ...) sont à base de silice SiO_2, (formateur) et de Na_2O et CaO, (modificateurs).

Les verres sodo-silicates sont chimiquement "fragiles", ils sont légèrement solubles dans l'eau. On y a donc ajouté de l'oxyde de calcium pour remédier à cet inconvénient.

7.2. Verres spéciaux

7.2.1. Verres d'oxydes lourds

Il peut être intéressant de remplacer les formateurs à base d'oxydes « légers » tels que SiO_2, B_2O_3, P_2O_5, par des oxydes « lourds » tels que Sb_20_3 [17], As_2O_3 [18], TeO_2 [19].

Ce Sont des verres possédant un indice de réfraction plus élevé et transmettent plus loin, jusqu`à 6-7 μm [17]. Les verres d'oxydes lourds sont utilisés comme source laser ou comme amplificateur optique.

7.2.2. Verres fluorés

Les fluorures peuvent former des verres comme les oxydes. En effet, le rayon ionique de l'ion F^- est très voisin de celui de l'ion O^{--} ($RF^- = 1.285$ Å; $RO^{--} = 1.35$ Å). En 1975, Marcel et Michel Poulain, chercheurs au laboratoire de chimie minérale de Rennes 1, découvraient par hasard les verres fluorés [20]. Par hasard, car l'état vitreux pour de tels matériaux n'est pas un état naturel. Depuis, les verres fluorés se sont développés.

Les verres fluoberyllés furent les premiers verres fluorés signalés. Le fluorure de béryllium, lui-même, donne un verre. Des verres multi-composants sont également obtenus notamment avec les fluorures alcalins et alcalino-terreux. Ces verres possèdent un indice de réfraction remarquablement faible. En raison de cette propriété, on a envisagé de les utiliser comme matériaux pour lasers de puissance**.** Leur utilisation reste limitée en raison de la toxicité du fluorure de béryllium mais aussi de leur hygroscopicité. Pour pallier ce dernier inconvénient, on a proposé des verres dits ABF (Aluminium Béryllium-Fluor), issus du système BaF_2- CaF_2-AlF_3 - BeF_2 [21].

Une nouvelle série de verres fluorés, dont le formateur est le fluorure de zirconium fut découverte. Ces verres ont fait l'objet de nombreuses études en raison de leur transparence dans l'infrarouge. Ces matériaux sont utilisés pour la réalisation de fibres optiques pour télécommunications [22]. Signalons d'autres verres fluorés à base de fluorure d'aluminium [23] ou de fluorure d'indium [24].

7.2.3. Verres de chalcogénures

Les verres de chalcogénures basés sur les éléments de VI^{ème} groupe (S, Se, Te) associés aux éléments du V^{ème} groupe (Si, Ge) sont reconnus comme des verres à haut indice de réfraction non-linéaire [25,26]. Ces verres sont également importants pour leurs propriétés optiques dans l'IR (verres transparents jusqu'à 30µm).

8. Propriétés du verre

Le verre est un matériau que l'on rencontre de plus en plus dans la vie courante. Il convient donc de connaître ces propriétés afin de pouvoir l'utiliser de manière ingénieuse [27].

8.1. Propriétés rhéologiques

La rhéologie est une science qui étudie les phénomènes de déformation et d'écoulement des solides et des fluides sous l'action des forces extérieures (mécaniques). Les verres par leur structure possèdent un comportement rhéologique très complexe. En effet aux températures très élevées les verres ont les propriétés de liquide visqueux et à des températures inférieures à Tg, la cohésion est grande, ils ont l'apparence d'un solide élastique.

8.1.1. La viscosité du verre

Le verre est un liquide en surfusion qui n'a pas de point de fusion défini comme dans le cas des métaux. Ainsi il se ramollit au fur et à mesure de l'augmentation de la température passant par différent domaines de viscosité, celui n'étant pas seulement une propriété essentielle pour la fabrication et le formage du verre, mais elle dépend de la nature et la structure du verre. Le phénomène de viscosité est lié avec les forces de frottement entre deux couches de n'importe quel corps. La cause de la viscosité est la transition des particules d'une couche à une autre. La viscosité a la même mesure que la force (en dynes) qu'il faudrait appliquer à 1cm² d'un feuillet du fluide considéré pour le déplacer à une vitesse uniforme de 1cm/s par rapport à un autre feuillet

parallèle situé à 1cm du précédent. Newton a proposé une formule liant les forces agissantes sur la surface des couches et la vitesse de déplacement des couches l'une par rapport à l'autre.

L'unité de mesure est P.A.S., lorsque la surface de frottement exercée sur une surface de $1m^2$ et de 1N pour une variation de vitesse dv =1m/s sur une distance dx =1m. La viscosité cinématique est exprimée comme suite :

$$V = \eta / d$$

- V : viscosité cinématique
- d : densité
- ŋ : coefficient de viscosité

Viscosité (Pa.s)	Les points (procédés)
$10^{19} – 10^{20}$	A Température 18-26°C
$+10^{13.5}$	Température < Température de recuisons
$10^{12.3}$	Température de transformation Tg
10^{12}	Température > Température de recuisons
$10^{7} - 10^{8}$	Bombage
10^{7}	combuge
$10^{6.6}$	Température de ramollissement
$10^{4} - 10^{7}$	Pressage
$10^{3} – 10^{6}$	laminage
10^{3}	Etirage (procédé Foucault)
$10^{2} – 10^{2.5}$	Fabrication manuelle
$10^{1.5}$	Température des liquides
$10^{1.48} – 10^{1.61}$	Coulage
10^{1}	Température > Température d'élaboration

Tableau 3 : Valeurs de viscosité pour les différents régimes d'élaboration et de traitement du verre selon PAVLOUCHKINE.

8.1.2. Dépendance de la viscosité

a. Influence de la température

La viscosité est un paramètre très important dans le processus d'élaboration du verre. En effet la viscosité conditionne le mode de fabrication des verres industriels celle-

ci étant un point primordial. Lorsque la température augmente la viscosité diminue tout d'abord peu, puis plus rapidement et enfin plus lentement pour atteindre, aux températures de fusion une valeur de 10^{12} poises. Ceci peut être expliqué par le fait qu'à haute température le pouvoir de mobilité des éléments structuraux est grand et les forces de liaison tendent à se rompre. Le verre à la température de fusion, la rupture des liaisons est semi totale et qui croit progressivement avec l'énergie thermique, ainsi il apparaît des fragments de dimensions relativement élevées d'où les déplacements sont limités et ainsi une viscosité élevée. Inversement par refroidissement des liaisons se referment progressivement et la viscosité augmente.

b. La tension superficielle

Elle joue un grand rôle lors de la fusion du verre et au cours des étapes de fabrication. On la définit comme suit : une particule située à l'intérieur d'un corps est attirée par toutes les particules voisines, si bien que la résultante est nulle. Si au contraire cette particule se trouve à la surface, il n'y a pas de force de ce côté et il s'en suit une force résultante dirigée vers l'intérieur, pour amener une particule de l'intérieur à la surface, il faut fournir un travail déterminé, les corps ayant une grande surface ont une énergie plus grande et ont tendance à prendre une énergie plus faible en diminuant la surface, les liquides prennent ainsi la forme sphérique. L'agrandissement d'une particule suppose le transport de particules depuis l'intérieur vers l'extérieur, ce qui exige par conséquent une dépense d'énergie : l'énergie nécessaire pour former une nouvelle surface de 1m2 est dire énergie libre superficielle, elle a pour unité [j/m^2]. En général, la notion de tension superficielle s mesurée en N/m est plus courante:

$$\sigma = A/S \ [J/m^2]$$

La diminution de l'énergie superficielle n'a pas seulement lieu physiquement par changement de la forme de la surface mais il peut y avoir aussi une influence chimique par le fait que se rassemblent les particules qui sont liées à l'intérieur par des forces moindres.

c. Influence de la composition

La dépendance passe de la viscosité et de la composition chimique est conditionnée par la rigidité des liaisons chimiques et le degré de cohérence réticulaire. Lorsqu'on passe des verres à un constituant aux verres à plusieurs constituants, il résulte des considérations structurales que les coupures affaiblissant le réseau, diminuant la viscosité comme c'est le cas des oxydes alcalins qui abaissent la viscosité à toutes les tempéra-

tures. On effet l'introduction des ions alcalins diminuent brusquement la viscosité à cause du volume des ions Li^+, Na^+, K^+ qui est petit et ainsi plus mobile.

8.2. Propriétés mécaniques

8.2.1. La dureté

La dureté en général est la résistance d'un solide à la pénétration d'une pointe, d'une bille d'un outil, c'est à dire à la déformation de la surface. Dans l'industrie verrière, la dureté est une des propriétés les plus importantes, c'est une grandeur qui nous détermine les verres durs et les verres tendres. Pour différencier les verres à faible coefficient de dilatation qui se ramollissent à température élevée (verres durs), des verres à coefficient de dilatation élevée (supérieur à 50.10^{-7} k^{-1}) qui se ramollissent à température relativement basse (verres tendres). Le classement des verres, au point de vue de la dureté dépend de la méthode d'essai. Ces différentes méthodes : rayure, abrasion, empreinte reposent sur des principes différents, elles conduisent donc à des résultats qui ne sont pas comparables. D'autres essais tel que celui du célérimètre ont été faits pour établir un classement plus précis. Ce classement se base soit sur la valeur de la force nécessaire pour créer une rayure de dimension donnée, soit sur les dimensions d'une rayure créé sous l'effet d'une donnée.

La résistance mécanique La résistance mécanique d'un matériau, est son aptitude à résister aux forces destructives. Il existe plusieurs types de résistance mécanique selon la nature des forces destructives appliquées, on cite :

8.2.2. Résistance à la traction et résistance à la compression

Le verre tire sa dureté et sa résistance de sa base de silicate, mais également sa fragilité connue et indésirable. C'est une propriété à laquelle il faut dédier toute l'attention qui lui est due, quel que soit le type d'application. Contrairement aux métaux, le verre n'a pas de plage plastique :

- Il est élastique jusqu'à sa limite de rupture.
- La rupture est soudaine, sans signe préalable visible.
- La résistance à la compression du verre est très élevée et dépasse de loin celle des autres matériaux de construction.

C’est pourquoi les problèmes sont rares lors du montage de vitrages sur un bâtiment. La résistance à la traction est un facteur déterminant, en particulier la résistance à la flexion. Il est connu que les fibres de verre présentent une très bonne résistance à la traction. Mais il existe une très grande différence entre la résistance à la traction d’une fibre de verre et celle d’une plaque de verre. La résistance à la traction de la plaque de verre ne dépend pratiquement plus de la cohérence de la structure chimique, mais d’autres facteurs. En réalité, le verre n’est pas un corps compact plein, mais présente de nombreuses discontinuités, comme des imperfections de surface sous la forme de micro rayures et d’entailles. Ce sont elles qui au final déterminent la résistance du verre dans la pratique. Il est également important de noter que la résistance diminue en fonction de la durée d’application de la charge. C’est pourquoi, dans la pratique, différentes tensions admissibles sont prises en compte, en fonction de la durée d’application de la charge. Un exemple type de charge de courte durée est la charge due au vent, alors que les charges dues à la neige peuvent s’exercer pendant une plus longue période.

8.2.3. Dureté superficielle

La résistance mécanique La résistance mécanique d’un matériau, est son aptitude à résister aux forces destructives. Il existe plusieurs types de résistance mécanique selon la nature des forces destructives appliquées, on cite :

a. Résistance à la traction

La limite de rupture à la traction est la charge maximale produisant la rupture au cours d’un essai de traction cette charge étant rapportée à la section de l’éprouvette. Sa valeur est une vingtaine de fois plus faible que celle de la résistance à la compression. Elle dépend de nombreux facteurs :

- Dimensions de l’éprouvette
- Etat de surface de l’éprouvette.
- Température pendant l’essai.
- Durée de l’application de la charge

b. Résistance à la flexion

La flexion est la méthode la plus apte à la mesure de la résistance du verre, en comparaison avec la traction qui provoque des tensions pendant le démarrage des machines de traction. Par contre pour la flexion l’échantillon ne subit aucune tension causée par

serrage. Pour le verre ordinaire, elle a une valeur faible allant de 0,03 à 0,12 GPa. On doit, cependant, faire la distinction entre la résistance théorique et pratique. La constante de proportionnalité E qui apparaît dans cette équation est appelée module de YOUNG ou module d'élasticité.

c. Caractéristiques mécaniques en fonction de la température

À température ambiante, loin de la température de transition vitreuse, le verre possède une viscosité supérieure à 19^{19} P.A.S. Il peut être considéré comme un solide. Sous l'effet d'une contrainte de tension B croissante, la déformation varie proportionnellement à la contrainte, et cela jusqu'à la rupture. La rupture survient brutalement sans qu'elle puisse être détectée préalablement. On dit que le verre est un matériau fragile. Il ne présente aucune plasticité macroscopique. En fait, l'expérience de tension ne peut être correctement effectuée que pour les fibres de faible diamètre. Dans la plupart des cas, le module d'Young E, est obtenu par des essais de flexion trios points ou quatre points en statique. En dynamique, on utilise la mise en résonance de barreaux ou la propagation d'ondes longitudinales et transversales générées par des matériaux piézoélectriques.

Dans l'expérience précédente, le comportement du verre est celui d'un solide de Hook.

$$\sigma = E.\varepsilon$$

Où ε: est la déformation.

Le verre étant isotrope, le couple de modules E et G (module de cisaillement) est suffisant pour calculer le coefficient de Poisson ν:

$$E= 2G (1+\nu)$$

Le verre montre un comportement élastique quasiment parfait jusqu'à des températures proches de la transition vitreuse. Cependant, certains verres, contenant des ions extrêmement mobiles (ions alcalins), peuvent présenter une faible élasticité différée (anélasticité) associée à la diffusion sous contrainte de ces ions. Cette élasticité différée est le plus souvent analysée en soumettant le verre à une contrainte sinusoïdale (pendule de torsion, résonance

de barreau, propagation d'ondes ultrasonores). Le déphasage entre la contrainte et la déformation, est aussi appelé frottement interne.

8.3. Propriétés thermiques

La fabrication du verre est un processus mettant en jeu des températures très élevées, si bien que les propriétés thermiques jouent un rôle important. En outre la connaissance de la chaleur massique est particulièrement importante pour l'étude de la nature du verre.

8.3.1. Chaleur spécifique

La chaleur spécifique représente la quantité de chaleur absorbée par une unité de masse du verre quand il s'échauffe d'un degré. Pour réchauffer un produit de masse m d'une température T1 a une température T2, il faut dépenser une quantité de chaleur tel que.

$$\varphi = c_{p.}\, m\, (t_1 - t_2)$$

Où :

- φ: Quantité de chaleur en joule.
- $c_{p\,:}$ Chaleur spécifique massique a pression constante (j /kg. °C).
- m : Masse en Kg.
- ΔT : variation de la température en °C.

Pour les verres silicatés C_p est comprise entre 0.3 et 1.05 kJ /kg. °C.

8.3.2. Dépendance de la chaleur spécifique

a. Influence de la température

Quoique la chaleur spécifique est considérée comme étant la variation de l'enthalpie par rapport au temps.

$$C_p = (\partial h/\partial t)_p$$

Et quoique celle-ci soit fonction de la température représentée par la formule suivante :

$$Cp = c_v + [(\beta.t)/(\rho.\, x)]$$

- **β**: coefficient de dilatation cubique.
- **ρ** : masse volumique.
- **x** : compressibilité.

- **t :** température.

L'influence de celle-ci sur la chaleur spécifique d'un verre industriel reste faible (75.2 %SiO_2, 1.6 % Al_2O_3, 8.4 % CaO, 0.6 %K_2O et 14.2 % Na_2O), la chaleur spécifique dans les intervalles de température est :

- à 100°C→ 0.202 Cal/g degré
- 20~700°C →0.265Cal/g degré
- 20 à 1300°C→ 0.294 Cal/g degré

b. Influence de la composition chimique

Il n'existe pas de dépendance directe entre la chaleur spécifique massique et la composition chimique du verre mais il est cependant possible de déterminer la chaleur spécifique par un calcul à partir des constituants mais cette théorie n'est valable que pour un intervalle de température donné (20 à 100 °C). Pour ça on peut utiliser la formule suivante :

$$\mathbf{C_p = \sum \ C_{pi.} P_i}$$

- $\mathbf{C_{pi}}$: Chaleur spécifique moyenne de chaque constituant.
- $\mathbf{P_i}$**:** Pourcentage en poids de chaque constituant.

L'augmentation de la teneur en oxydes modificateurs entraîne une augmentation de la chaleur spécifique massique contrairement au PbO qui diminue sensiblement la chaleur spécifique.

c. Conductibilité thermique

C'est le pouvoir ou la capacité d'un matériau de transmettre à travers son épaisseur un flux thermique résultant d'une différence entre la température qui régit entre les surfaces d'un échantillon. Ceci peut être justifie par la formule suivante :

$$\mathbf{Q = \lambda F\ (t_2 - t_1).r/e}$$

- **λ**: Coefficient de conductibilité thermique en j/m.sec.°C.
- **Γ**: Temps en sec.
- **e** : épaisseur en m.
- **F:** surface en m^2.

Généralement le coefficient de conductibilité thermique des verres silicates est compris entre 0.85 à 1.34 j/m.°c.S.

Le transfert de chaleur dans les verres peut avoir lieu par conduction et par rayonnement. La conduction s'effectue généralement à des températures moyennes. Le rayonnement s'effectué à haute température.

Donc on définit la conductibilité thermique par conduction Jc par la relation suivante :

$$\mathbf{dQ/dt = -\lambda .c .s\ dt/dx}$$

- **S** : surface par laquelle s'écoule la quantité de chaleur dQ perpendiculairement.
- **dt** : le temps pendant lequel s'écoule dQ.
- **dt/dx** : le gradient de la température.

La conductibilité par rayonnement Jr est régit par la formule suivante :

$$\mathbf{\lambda r=(16\sigma.n^2.T^3)/3K}$$

- **σ**: Constante de Stéphan-Boltzmann.
- **n**: Indice de réfraction.
- **T :** température.
- **K :** coefficient d'absorption.

La conductibilité thermique est inversement proportionnelle à l'augmentation des oxydes modificateurs, ainsi l'introduction des alcalins entraîne un abaissement de Jc , beaucoup plus importante pour K_2O que Na_2O.

d. Dilatation thermique

La dilatation thermique est une propriété aussi importante que la viscosité et d'une importance majeure qui se produit surtout lors du refroidissement de la fonte, chaque particule de la matière oscille par suite de l'énergie thermique, lorsque la température augmente, l'énergie thermique augmente et il en résulte un accroissement de l'amplitude de vibration des particules. Ainsi deux atomes liés l'un à l'autre par des forces (non-harmonique) voient leur distance augmentée à cause de ce processus et cela signifie que

lorsque la température s'élève il se produit une dilatation. On caractérise la dilatation thermique par :

- Le coefficient de dilatation linéaire L (coefficient moyen d'augmentation de la longueur).
- Le coefficient de dilatation cubique I (coefficient moyen d'augmentation de volume).

Le coefficient de dilatation linéaire augmente avec l'augmentation de la température. Le passage du verre de l'état figé a l'état fondu avec l'augmentation de la dilatation correspond à ce dernier état constitue le principe de la détermination de la température de transformation.

Le verre de silice à une structure désordonnée par la suite des liaisons Si-O fortes les possibilités d'oscillations des atomes qui le constitue est limité. Le coefficient de dilatation est par conséquent très petit pour le verre de silice.

Par l'introduction d'oxydes alcalins binaires cela ne change pas beaucoup de possibilités d'oscillation des tétraèdres [SiO_4].

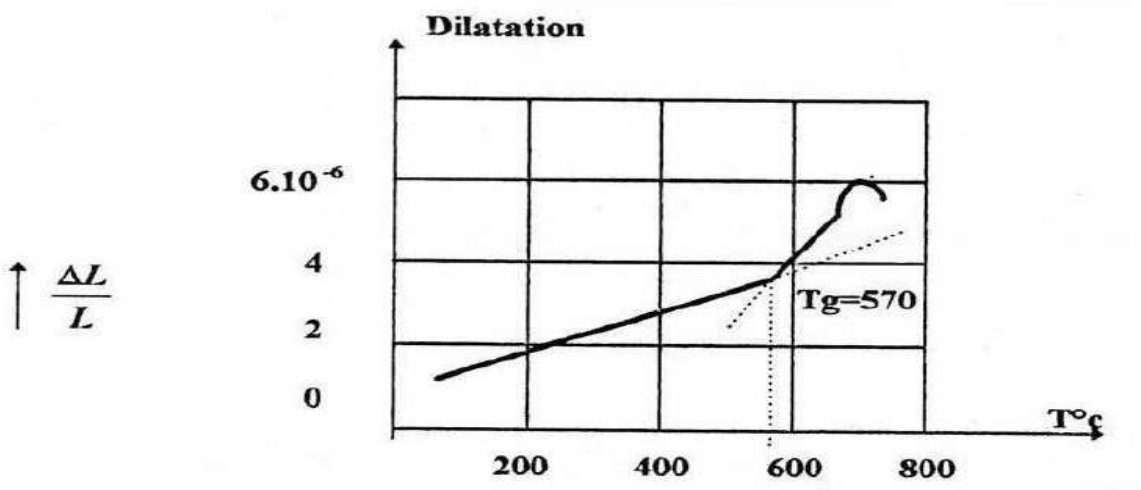


Figure 5: la courbe de dilatation thermique en fonction de la température.

8.4. Propriétés optiques du verre

8.4.1. Réfraction

Si un rayon lumineux passe de l'air ou sa vitesse est très voisine de la vitesse maximum C_0, dans le verre, sa vitesse de propagation se trouve alors réduite suite des interactions qui s'effectuent entre les rayonnements lumineux et les ions qui composent le verre. Ce phénomène peut être décrit par la loi de réfraction :

$$\mathbf{n = C_0/C = \sin \alpha / \sin ß}$$

- **n** : L'indice de réfraction.
- α et **ß** : angle de rayon lumineux avec la normale respectivement dans l'air et dans le verre.

L'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde J. Cette dépendance est appelée dispersion.

$$\mathbf{D=dn/d\lambda}$$

La dispersion est caractérisée par le nombre d'abbé ν

$$\mathbf{\nu = n_{D-1} / (n_f - n_c)}$$

- $\mathbf{n_f}$ **:** Indice de réfraction pour J= 486.1nm (raie bleue de H).
- $\mathbf{n_c}$ **:** Indice de réfraction pour J= 656.08 nm.
- $\mathbf{n_{D-1}}$ **:** Dispersion partielle.
- $\mathbf{(n_f - n_c)}$ **:** Dispersion principale.

Les verres avec n faible et s'appellent les verres CROWNS n élevé et s'appellent les verres FLINTS.

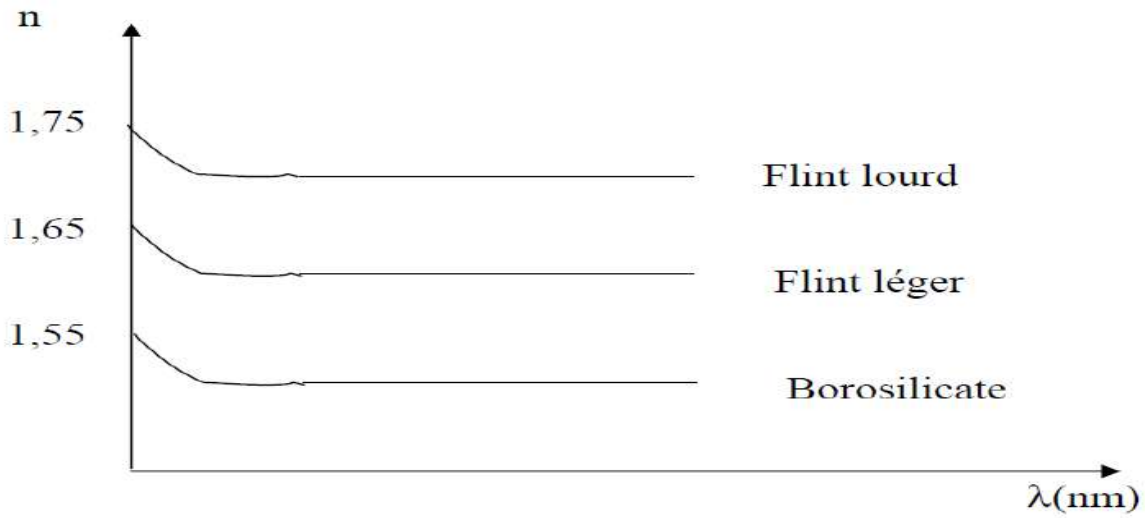


Figure 6 : Indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde.

a. Influence de la composition

Dans le verre de silice il n'y a que des oxygènes pontant, possèdent une polarisabilité faible. De ce fait, Le verre de silice a un indice de réfraction relativement faible avec nD= 1.4589. Silicates Dans les alcalins binaires, il existe des oxygènes non pontant qui ont une polarisabilité plus grande, ce qui a pour conséquence une élévation de l'indice de réfraction.

b. Influence de la température

On peut déduire de l'équation ci-après que l'indice de réfraction dépend de la masse volumique

$$dn / dT = \partial n / \partial T + (\partial n/\partial \varphi)\,(d\partial/dT) = \partial n/\partial T - ß\varphi\,(\partial n/\partial T)$$

- **ß** est le coefficient de dilatation cubique et
- $\partial n/\partial T$ représente l'influence de la température sur l'indice de réfraction à masse volumique constante, ce facteur dépend de la polarisabilité.

Si la température croit, l'influence des cations sur les ions O^{-2} devient plus faible, la polarisabilité augmente faiblement, et le coefficient $(\partial n/\partial T)$ est également positif.

$(\partial n/\partial T)$ peut aussi bien prendre une valeur négative qu'une valeur positive, c'est-à-dire que n peut croître lorsque la température augmente.

c. Transmission optique

L'utilisation courante des verres d'oxydes est liée à leur bonne transmission dans la partie optique (U.V + visible+ infrarouge) du spectre. Cette fenêtre optique qui correspond à la sensibilité spectrale de l'œil humain, est dû à ce que les transitions électroniques de la bande de valence vers la bande de conduction correspondent à la coupure dans l'ultraviolet alors que les vibrations propres des ions constituants du réseau produisent leurs effets dans l'infrarouge. L'absorption dans le visible résulte de la superposition des (queues) des transitions électroniques et vibrationnelles auxquelles il faut ajouter les contributions dues à l'impureté telle que les ions des éléments de transition et les centres de couleur. Cette propriété est caractérisée pour trois facteurs :

c.1. Facteur de transmission T

C'est le rapport du flux lumineux émergeant F_e au flux incident F_0 : $\mathbf{T = F_e / F_0}$

Pour un produit donné, ce facteur de transmission varie avec la longueur d'onde J de la lumière incidente.

c.2.Facteur d'absorption A

C'est le rapport du flux lumineux absorbé Fa au flux incident Fi :

$$\mathbf{A=F_a/F_i}$$

- Dans le spectre visible (J=0.4 à 0.8μm) le facteur d'absorption de la plus part des verres utilisée en vitrage a sensiblement la même valeur, de l'ordre de 2% dans toute l'étendue du spectre ce chiffre est valable pour des produits de faible épaisseur.
- Dans le spectre ultraviolet (J<0.4 à 0.8μm) Jusqu'à 0.36 μm, l'absorption par les verres ordinaires demeure du même ordre de grandeur que le spectre visible.
- Dans le spectre infrarouge (J>0.8 μm). L'absorption est faible jusqu'à 2 μm, puis augmente très fortement, pour être pratiquement totale au de la de 5 μm.

c.3.Facteur de réflexion

La réflexion est une propriété optique aussi intéressante elle se passe toujours sur la frontière entre le corps dense et l'air. Donc la réflexion c'est le rapport de flux lumineux Fr au flux incident Fi

$$\mathbf{A=F_0/F_i}$$

8.5. Propriétés électriques

Un corps est électriquement conducteur si les électrons ou les ions libres à l'intérieur de ce corps permettent le transport de courant. Cette propriété est caractérise par la conductivité électrique volumique N qui représente la conductance d'un corps cylindrique de section $1cm^2$ et de longueur 1cm. La valeur inverse de N est la résistivité électrique volumique F. L'unité de F est O.cm celle de N est s/cm.

Au point de vue de leurs structures, les verres sont formes d'un réseau dans lequel s'insèrent les cations modificateurs. Puisque ceux-ci avant tout les ions alcalins, sont liés dans le réseau surtout de façon ionique, ils ont une certaine mobilité, si bien que les verres possèdent une faible conductivité électrique. Il avait été constaté depuis longtemps que la loi de faraday était ainsi observée.

8.5.1. Dépendance de la composition

La conductivité dépend d'une manière complexe de la composition. Les études les plus récentes sur un verre $Na_2O_3.SiO_2$ à 300°C par ENGEL et TOMAZAWA ont donnés pour f une valeur de 0.5 et ainsi ils ont montré que la diffusion de Na dans ces conditions était indépendante des champs électriques.

Si un verre ne contient pas de modificateur de réseau, il doit posséder une conductivité très faible.

Pour le verre de B_2O_3 pur, on devrait s'attendre aussi à une résistivité très élevée. En passant au verre de silicates alcalin on constate alors que deux facteurs agissent sur la conductivité, la force de liaison des ions dans le réseau et leurs dimensions. L'introduction de l'ion K^+ est plus faiblement lié, mais à cause de son rayon plus il oppose une résistance plus à la migration, tandis que pour l'ion Li^+ c'est le contraire.

Généralement F augmente faiblement dans l'ordre de Li-Na-K-CaO consolide la structure et conduit de ce fait a une forte augmentation de la résistivité.

8.5.2. Influence de la température

L'interprétation de la formule qui suit conduit à la mise en évidence de l'influence de la température sur la conductivité électrique.

$$\mathbf{Ln\ x = A^{-Ex/RT}}$$

- **Ex** : l'énergie d'activation de la conductivité électrique.
- **A :** Une grandeur en fonction de la température.

$$\mathbf{A = C^{te} . Ln\ 1/t}$$

L'idée que les mobilités et par conséquent la conductivité électrique ainsi l'influence de la température est principalement déterminée par l'énergie d'activation, pour les verres habituels elle est de l'ordre de 80kj/mole. Cette énergie est déterminée par le franchissement de la barrière de potentiel.

8.6. Propriétés chimiques

La durabilité chimique est l'expression de la résistance du matériau à un environnement. 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 la perte en masse par unité de temps de l'échantillon dont le volume est bien inférieur à celui de la solution corrosive.

Dans les verres de silicates classiques contenant des oxydes alcalins, l'ion alcalin est très mobile. La surface d'un verre, laissé au contact de l'air, s'enrichit progressivement en alcalin qui réagit avec le CO_2 ambiant pour donner un carbonate soluble.

Au contact d'une solution aqueuse de pH neutre, le sodium est échangé par les protons de la solution suivant le schéma réactionnel.

Une solution acide favorise cet échange ; une solution basique, à base de sel de sodium, limite cette réaction. La conséquence directe d'une corrosion menée sans renou-

vellement d'eau est que le pH d'une eau pure augmente progressivement en raison de la libération des alcalins du verre.

L'échange ionique est cependant moindre si l'ion alcalin joue le rôle de compensateur de charge au voisinage de groupes $(AlO_4)^-$ ou $(BO_4)^-$.

Le deuxième type de mécanisme impliqué dans la corrosion est l'hydrolyse du réseau selon la réaction.

Cette réaction, favorisée en milieu basique (OH^-) est une attaque nucléophile nécessitent un réarrangement atomique. Les atomes de silicium liés à des oxygènes non pontant sont plus mobiles et facilitent cette réaction. La RMN (résonance magnétique nucléaire) à angle magique du silicium donne la distribution des divers types de silicium.
La réaction est favorisée au niveau des entités structurales sous contrainte (cycles à 3 ou 4 atomes de silicium) ou en présence d'une contrainte externe. Notons que la réaction inverse de polycondensation ou de restructuration peut également se produire si la localisation des deux groupes dans le réseau le permet. Ce phénomène entraîne une restructuration des couches altérées. Dans des solutions très basiques (pH >10), l'hydrolyse du réseau est totale et conduit à la dissolution du verre.

Les verres résistant aux solutions basiques (par exemple, au contact du ciment) sont des verres contenant une quantité appréciable de zircone, ZrO_2. Préalablement à ces deux réactions essentielles qui sont la cause de la corrosion, l'eau doit diffuser au travers du réseau vitreux.

Cette diffusion dépend de la constitution du réseau. La molécule d'eau de diamètre égal à 0,28 nm, diffuse librement si le verre est constitué par des anneaux de grande taille (n > 6, où n: est le nombre de silicium). Au contraire, l'hydrolyse d'une liaison Si–O–Si est nécessaire pour n < 6. Il y a donc limitation à la diffusion de l'eau moléculaire. Cependant, si le nombre de tétraèdres formant le cycle est faible n = 3, 4,… l'hydrolyse est facilitée en raison de la contrainte interne associée aux angles de liaisons des cycles.
Dans quelques verres, il a été noté une expansion du réseau causée par la diffusion de l'eau moléculaire.

La corrosion des verres est un phénomène complexe qui peut prendre des formes variées suivant :

- La nature et la composition du verre
- Le pH et la nature des sels dissous dans la solution de corrosion
- Le renouvellement éventuel de la solution
- La température l'état de contrainte du verre

CHAPITRE DEUXIEME

DIFFERENTES TECHNIQUES DE FABRI-CATION DU VERRE PLAT

CHAPITRE DEUXIEME : DIFFERENTES TECHNIQUES DE FABRICATION DU VERRE PLAT

I. DEVELOPPEMENT DU VERRE PLAT

1. Verre plat soufflé

Tout d'abord coulé sur table (c'est-à-dire versé et étendu sur une table de bois ou un lit de sable) à l'époque romaine, le verre plat ou verre à vitre fut obtenu dès le XII^{ème} siècle selon les deux techniques de soufflage suivantes :

1.1. La technique du verre soufflé en manchon

Le verrier souffle une bulle cylindrique dont il coupera les deux extrémités avant de la fendre sur toute sa longueur. Le cylindre ouvert est ensuite placé dans un four de recuisons pour être complètement déroulé et former une feuille à peu près rectangulaire.

1.2. La technique du verre soufflé en plateau

Le verrier souffle une bulle qu'il ouvrira à une extrémité pour obtenir, par un mouvement très rapide de rotation, un disque plat.

À côté de ces deux techniques de soufflage à la volée, il faut mentionner également un procédé qui semble avoir été peu utilisé, celui du soufflage dans un moule : il permet de former un volume creux dont les côtés seront détachés afin d'obtenir de petites surfaces de verre plat.

2. Verre plat étiré

L'étirage d'un ruban (feuille) de verre par immersion d'une e pièce réfractaire appelée « débiteuse » dans le bain.

- Le verre liquide ensuite passe à travers la fente longitudinale de la débiteuse sous l'effet de la pression hydrostatique.

- A l'aide des refroidisseurs qui sont des boites métallique s ou circule de l'eau et qui sont situées au-dessus de la débiteuse, le verre est refroidis fortement.

- Au-dessus des refroidisseurs, des rouleaux métalliques entrainent verticalement le ruban de verre d'une longueur de 7m environ. Les largeurs de la feuille de verre, sont comprises entre2 m - 2,5 m et les épaisseurs entre 0,5 et 10 mm.

- La vitesse d'étirage en 2mm est d'environ 90m/h (elle varie en fonction de l'épaisseur voulue).

- L'inconvénient major du procédé de Fourcault, est les défauts de surface dus au contact de la débiteuse.

- L'avantage du procédé de verre flotté (Float glass) : obtention de meilleur polissage des surfaces (élimination des défauts de surface).

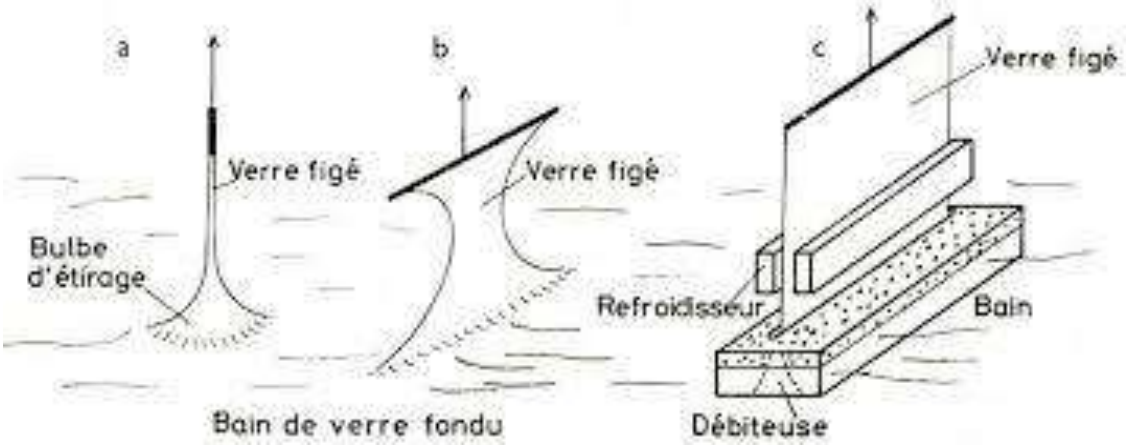


Figure 7 : procédés FOURCAULT.

3. Verre plat laminé

Le verre feuilleté (nom usuel) ou verre laminé (nom technique) est constitué d'au moins deux feuilles de verre séparées par des films intercalaires collants, généralement de nature plastique, qui maintiennent les morceaux de verre lors d'un bris. Le verre feuilleté de sécurité est un verre qui ne présente pas ou peu de danger de blessure lorsqu'il se casse. Typiquement, il n'est pas traversé lors d'un impact normal, et les morceaux de verre brisé sont maintenus par le film intercalaire transparent collant.

Il est notamment utilisé pour les pare-brise des voitures. Le film intercalaire peut être de couleur, donnant ainsi un aspect coloré au verre sans colorer le verre lui-même.

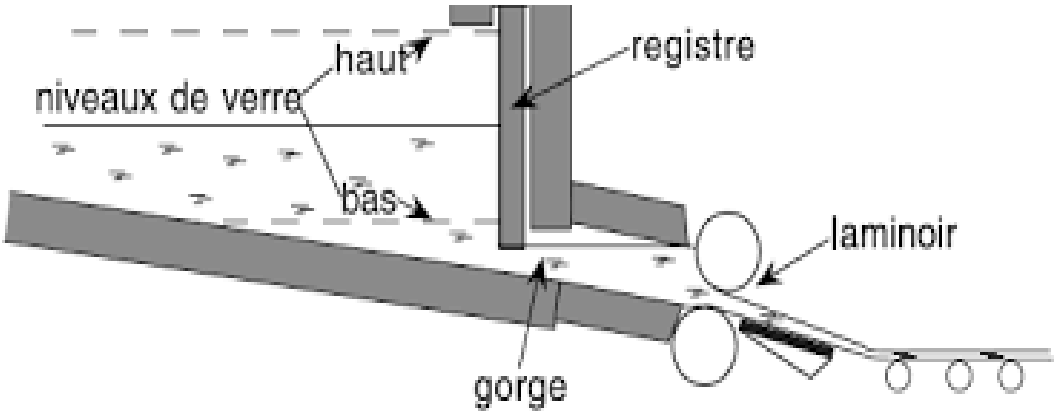


Figure 8 : schéma de procédés de laminage.

4. Verre plat flotté

Le premier travail est dû à M. Henry Bessemer qui obtint un brevet pour un procédé de production du verre sur un lit de métal fondu. Le système de production actuelle se base sur le dispositif breveté par Sir Alastair Pilkington [28]. Le verre float est un type de verre fabriqué par flottage sur un lit de métal fondu, (généralement l'étain), le plomb et d'autres alliages à bas point de fusion ont été utilisés dans le passé. Cette méthode donne à la feuille du verre une épaisseur uniforme et une surface très plane et un polissage ultérieur est inutile [29,30]. Afin d'éviter toute oxydation du bain, la production du verre se fait sous atmosphère contrôlée neutre ou légèrement réductrice. Actuellement le procédé float est le plus utilisé pour produire du verre plat de haute qualité au niveau mondial, il remplace quasi intégralement les techniques d'étirages [31].

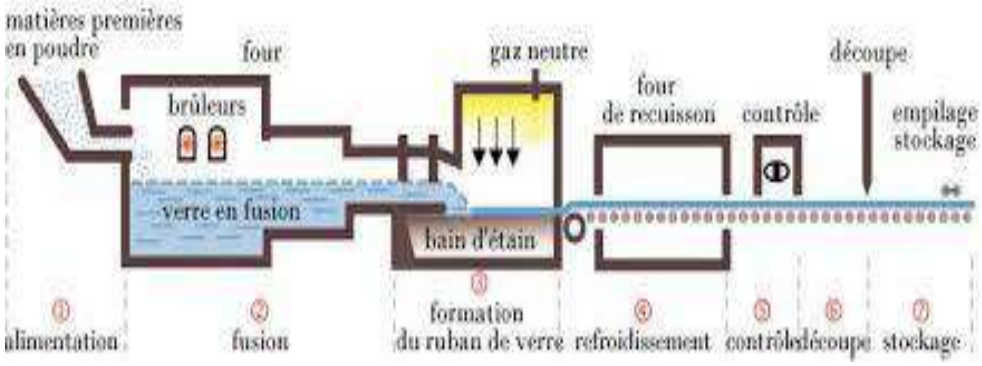


Figure 9 : Schéma de procédés de verre plat flotté.

CHAPITRE TROISIEME

MATERIELS ET METHODES

CHAPITRE TROISIEME : MATERIELS ET METHODES

I. LA MATIERE PREMIERE UTILISEE POUR LA FABRICATION DU VERRE

La composition chimique du verre dépend essentiellement toujours des propriétés recherchées et l'abondance des matières premières. Généralement les minerais composant le verre float sont le sable, le carbonate de soude, le calcaire et la dolomie.

1. Sable (SiO_2)

Le sable est la principale matière première de la masse totale du verre, intervenant dans la fabrication du verre. Le point de fusion du sable est trop élevé. Pour que la fusion soit économique, il faut ajouter un fondant, pour réduire la température de fusion.

2. Carbonate de soude (Na_2CO_3)

C'est la source principale 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, augmente le coefficient de dilatation, et la conductivité électrique [32].

3. Dolomie ($CaMg(CO_3)_2$)

L'oxyde de magnésium (MgO) est mis essentiellement afin d'éviter la dévitrification. Aussi, le MgO est un meilleur stabilisant pour le verre que CaO [33].

4. Calcaire ($CaCO_3$)

L'introduction de CaO dans le verre entraîne l'amélioration de la résistance à l'attaque chimique et l'augmentation de la densité, du coefficient de dilatation thermique et de l'indice de réfraction. Cependant, il décroit la résistance mécanique [33].

5. Feldspath [$(K,Na)AlSi_3O_8$]

Il est ajouté afin d'améliorer la résistance chimique et d'augmenter la viscosité à basse température.

6. Sulfate de sodium (Na_2SO_4)

Il est utilisé dans la fabrication du verre comme un agent affinant dans le mélange vitrifiable. Il est également utilisé pour la fabrication des détergents.

7. Charbon

Il est utilisé dans le mélange vitrifiable comme un réducteur d'oxygène libéré lors de la décomposition de Na_2SO_4.

8. Oxyde de fer

Ajouté avec des faibles quantités, il est considéré comme un agent colorant, il donne au verre sa couleur verdâtre. Le second rôle d'oxyde de fer est d'assurer la stabilité de régime thermique dans le four de fusion grâce à sa bonne conductivité thermique.

9. Calcin

L'emploie du calcin a une grande importance car la fusion de ce dernier consomme moins d'énergie que le mélange vitrifiable [34].

II. LES ETAPES DE FABRICATION DU VERRE PLAT FLOAT

La fabrication du verre float (figure 9) passe par cinq étapes :

1. Enfournement des matières premières
2. Fusion.
3. Formage.
4. Recuit.
5. Découpe.
6. Contrôle qualité et stockage

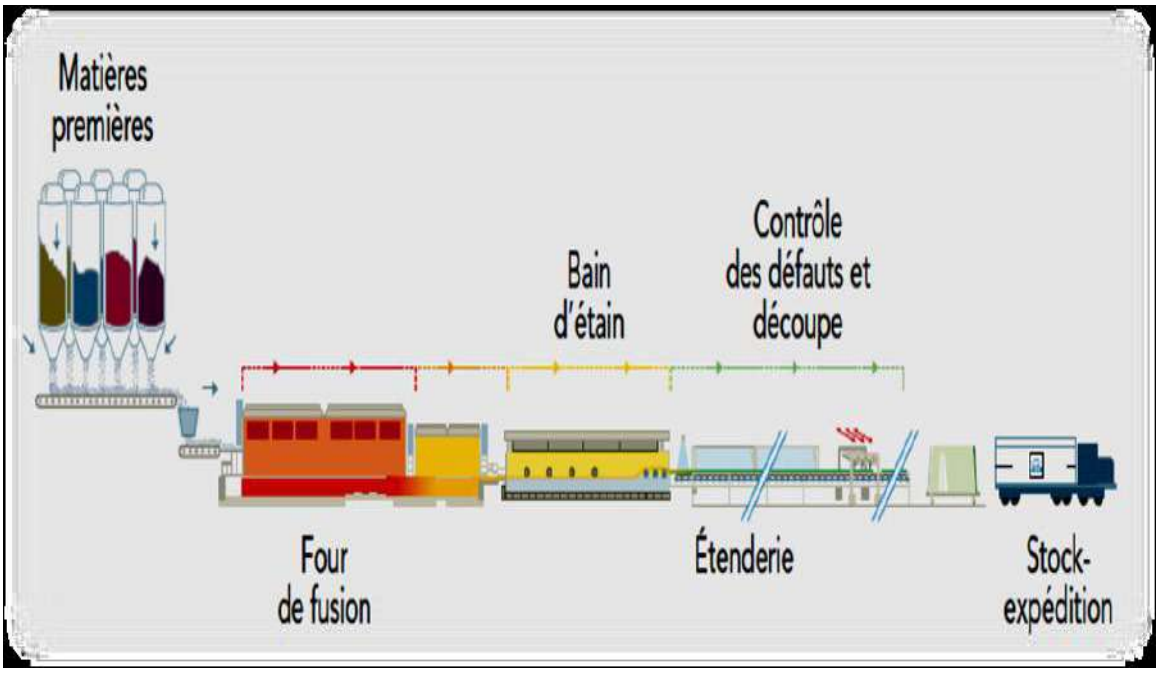


Figure 10: Schéma du procédé float.

1. Enfournement des matières premières

Les matières premières sont contrôlées et stockées au niveau de l'atelier composition qui est composé de grands silos de stockage. Elles sont pesées et acheminées vers le four dans des bandes transporteriez.

Le four est équipé par quatre enfourneuses qui font l'alimentation du four par les matières premières. Les enfourneuses utilisées sont été fabriqué par la société ZIPPE d'Allemagne.

2. Fusion

Les matières premières (mélanges vitrifiable), pesées et mélangées sont introduites dans le four de fusion à flamme transversale, où la fusion a lieu à une température de 1550°C. Au cours de cette fusion, le mélange vitrifiable est transformé en une masse liquide dans laquelle se dissolvent même les particules les moins miscibles, c'est-à-dire les plus riches en SiO_2 et pauvres en Na_2O.

La fusion est suivie par un affinage au cours duquel disparait les bulles de gaz grâce à des substances en faible concentration, et enfin un conditionnement thermique qui sert à

abaisser la température du verre, et stabiliser le régime thermique dans le four ; et donc à la diminution des défauts et à l'augmentation de rendement.

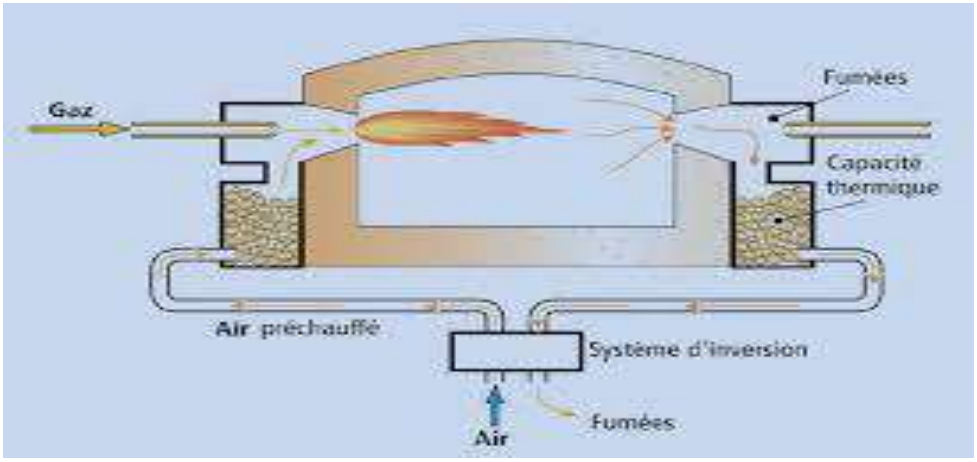


Figure 11 : Principe de fonctionnement d'une paire de régénérateurs.

3. Formage (bain d'étain)

C'est un système étanche avec une atmosphère contrôlée composée d'azote et d'hydrogène. Il se compose d'une structure en acier, d'une enveloppe métallique supérieure, d'une enveloppe métallique inférieure protégée de l'étain par des réfractaires spéciaux et de systèmes de contrôle de la température du ruban de verre et du formage (figure 11).

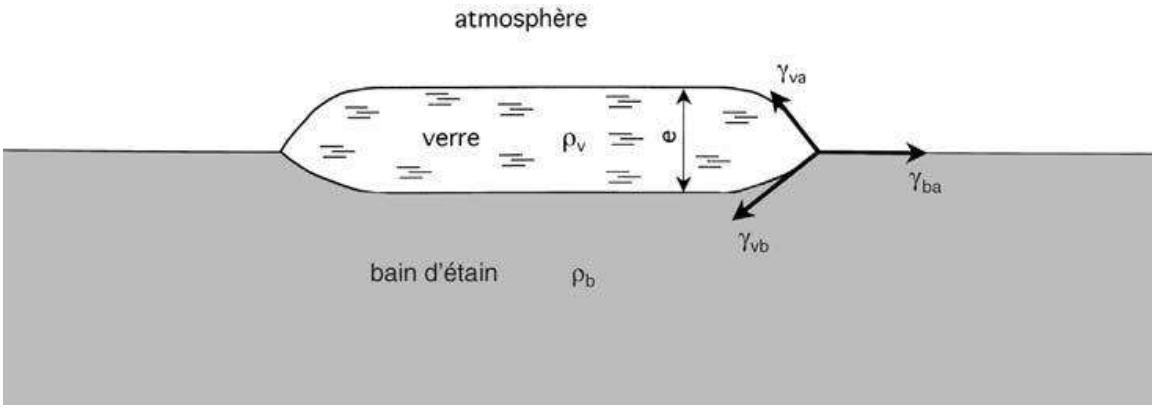


Figure 12: Épaisseur d'équilibre d'une feuille de verre flotté.

Le bain mesure environ 60 m de long sur 8 m de large avec une vitesse de défilement pouvant atteindre jusqu'à 25 m/min. Il contient près de 200 tonnes d'étain pur, fondu à une température moyenne de 800 °C.

Des résistances électriques (figure 12), regroupées en zones de chauffage, permettent une régulation fine de la température du verre qui est progressivement réduite. Pour un débit de verre fixé et une largeur imposée de la feuille, son épaisseur est déterminée par les Top Rolls.

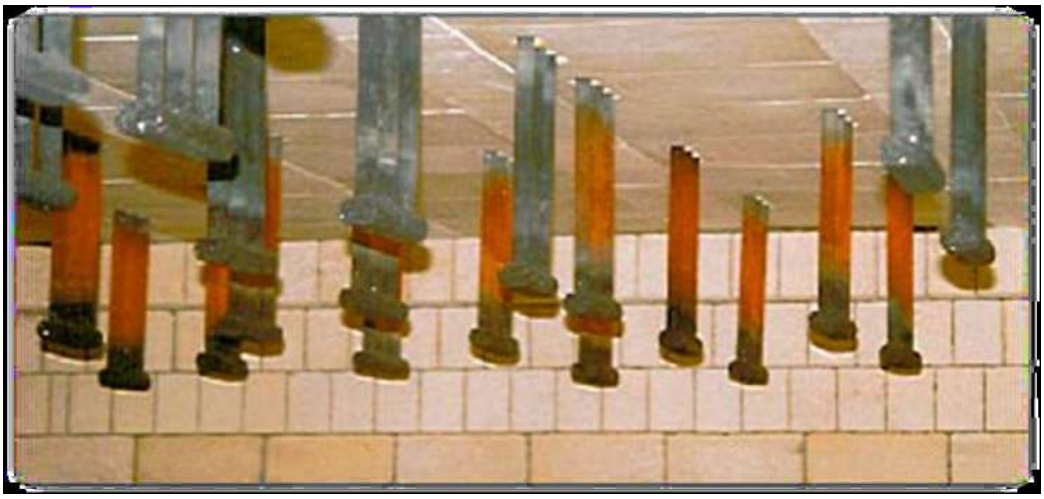


Figure13: Résistances électriques du bain d'étain.

Le verre liquide est dirigé sur un bain d'étain liquide. Le fait de flotter librement sur la surface absolument plane du bain d'étain allié à un chauffage simultané de la surface supérieure (poli naturel) permet d'obtenir une feuille de verre aux faces parallèles, similaire à un miroir. Des rouleaux, appelés Top Rolls (**figure 13**), permettent de définir l'épaisseur du verre.

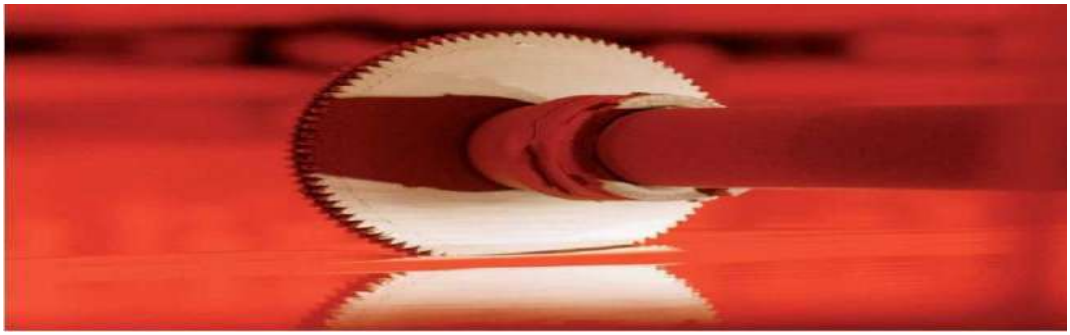


Figure 14: Top Roll en contact avec le ruban du verre.

4. Recuit

Après le bain d'étain, le ruban de verre passe dans un couloir de refroidissement appelé étenderie, dont la longueur dépasse 119,25 mètres. Il est refroidi 600 à 60°C environ. Ce refroidissement lent et contrôlé évite toute formation de tensions internes. C'est un élément important dont dépend la qualité du traitement ultérieur [35].

L'Etenderie est divisé en deux zones, chaque zone est constituée de plusieurs sections :

- La zone isolante (A0, A, B1, B2, C): le mode de refroidissement utilisé dans cette zone est le processus de radiation thermique, il est assuré au moyen des tubes disposés tout au long de la zone.

- La zone de refroidissement (D1, D2, E, F1, F2, F3): le processus de refroidissement utilisé est celui de la convection forcée.

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



Figure 15: L`étenderie de la float line.

5. Découpage

La dernière section de production est appelée « bout froid ». Elle comprend le contrôle qualité et la découpe. Le ruban de verre est contrôlé en continu à l'aide de rayons laser afin de détecter la plus petite imperfection car il est rare de pouvoir détecter à l'œil nu les zones qui ne répondant pas aux exigences de qualité.

Le verre est ensuite débité et empilé, en plaques standards de 6000 x 3210mm. Le verre peut également être directement préparé aux dimensions souhaitées par le client à l'aide d'une ligne de coupe séparée [35].

Les épaisseurs qui peuvent être produites peuvent varier de 2 à 19mm avec les formats donnés dans le tableau N° 4 suivant:

Format	*PLF*	DLF	1/2DLF
Dimension (mm x mm)	3210x6000 3210x 5100 3210x 4500	2000x 3210 2250x 3210 2400x 3210 2550x 3210 2600x 3210	2000x 1605 2250x 1605 2400x 1605 2550x 1605 2600x 1605

Tableau N°4 : Les différents formats de la feuille fabriquée du verre.



Figure 16 : Ligne de découpe.

6. Contrôle qualité et stockage :

Le suivi de toute la ligne se fait à ce niveau via la détection des défauts en automatique, le contrôle de l'épaisseur et des contraintes de verre ainsi que l'optimisation des différents formats de verre.

Les plateaux de verre sont placés, en piles verticales, sur des chevalets par des releveuses à ventouses. Cette empileuse automatique prélève directement les feuilles de verre à l'extrémité de la chaîne de fabrication qui se situe à environ 500 mètres du four. Les chevalets sont ensuite acheminés à l'entrepôt où les piles de verre seront stockées par épaisseur, famille de verre... avant expédition.

CHAPITRE QUATRIEME

ETUDE LES PARAMETRES DE PRODUCTION ET LES DEFAUTS DE VERRE DE 3 MM ET PROPOSEES POUR AUGMENTER LE RENDEMENT.

I. APERÇU SUR L'OBJECTIF DU TRAVAIL

Dans cette partie, nous avons pris connaissance du processus de fabrication du verre flotté, spécialement le changement des épaisseurs au niveau du bain d'étain. Nous allons analyser globalement les chiffres de production et des pertes enregistrées de chaque famille durant la campagne de 3mm. Nous allons par la suite dresser des recommandations que nous trouvons prometteuses et facilement réalisables pour augmenter le rendement de cette épaisseur.

Et aussi nous avons des défauts de verre du plusieurs types et cherché les causses probables pour trouver les actions correctives concernant les défauts. Tout ça pour améliorer le rendement.

Comme la qualité du produit fini est l'image de marque de chaque entreprise, nous allons exposer brièvement le contrôle qualité opéré à MFG et donner des un aperçu sur les équipements utilisés pour ce contrôle.

II. PRINCIPE D'OBTENTION DES EPAISSEURS AU NIVEAU DU BAIN D'ETAIN

Le verre circule dans le bain d'étain en trois (03) étapes :

- Ecoulement libre avec une vitesse constante (Spout-lip au 1 er TR)
- Vitesse avec accélération (positive pour produire le verre mince et négative pour produire le verre épais) dans la zone des top-rollers
- Vitesse constante causée par la vitesse d'entrainement de l'étenderie (à partir du dernier top-roller)

Une épaisseur est produite en jouant sur cinq (05) paramètres concernant les top-rollers :

1. La vitesse

La vitesse des TRs est très importante notamment celle du 1er. En production, la réduction de la vitesse de la première paire TR se traduira par un élargissement du ruban de verre qui devient plus mince et inversement. L'impact des vitesses des TRs est le plus important.

2. L'angle

Si la vitesse est le paramètre de base pour fabriquer les épaisseurs, l'angle est le deuxième paramètre à influencer directement l'épaisseur produite.

- Si la valeur de l'angle est positive (+) : il y a un élargissement transversal et réduction de l'épaisseur du ruban.
- Si la valeur de l'angle est négative (-) : il y a un rétrécissement transversal et augmentation de l'épaisseur du ruban
- Si la valeur de l'angle est neutre (0) : le top-roller est utilisé dans ce cas en guise de guidon pour maitriser le ruban.

Autrement dit, pour produire du verre mince, les angles doivent être positifs et inversement.

3. La pénétration

C'est l'introduction des TRs à l'intérieur du bain d'étain afin de maintenir le ruban tout en respectant le taux de rétrécissement naturel de ce dernier.

4. L'impression

C'est la force à fournir pour maintenir le ruban en équilibre selon l'épaisseur produite. Laforce appliquée en 10mm est naturellement supérieure à celle d'un ruban de 3mm.

5. Le nombre de Top Rolls

Plus on utilise de TRs, plus la stabilité du ruban de verre est obtenue. Il est recommandé d'utiliser tous les TRs même en production qui nécessite l'utilisation de 3 ou 4 comme le cas du 6mm. Le nombre est augmenté plus l'épaisseur est mince ou épaisse.

En production du 3mm, ci-dessous les paramètres utilisés :

	N° Top-Rollers		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
	Localisation (baie)									
ADS	Vitesse	G	210,4	309,0	382,6	449,3	495,1	539,6	off	off
		D	210,4	309,0	382,6	449,3	495,1	539,6	off	off
	Angle	G	-6,7	3,4	7,1	5,7	2,0	-3,7		
		D	-3,4	3,9	6,7	5,1	0,8	-4,8		
	Pénétration (mm)	G	2898,0	2879,0	2929,0	2966,0	2672,0	2657,0		
		D	2937,0	2921,0	2970,0	2839,0	2795,0	2668,0		
	Impression	G	-2,0	-9,6	-0,8	-15,6	-16,4	-41,2		
		D	-10,4	-16,3	-14,8	-8,3	-27,3	-24,0		

Tableau 5 : les paramètres de l'épaisseur.

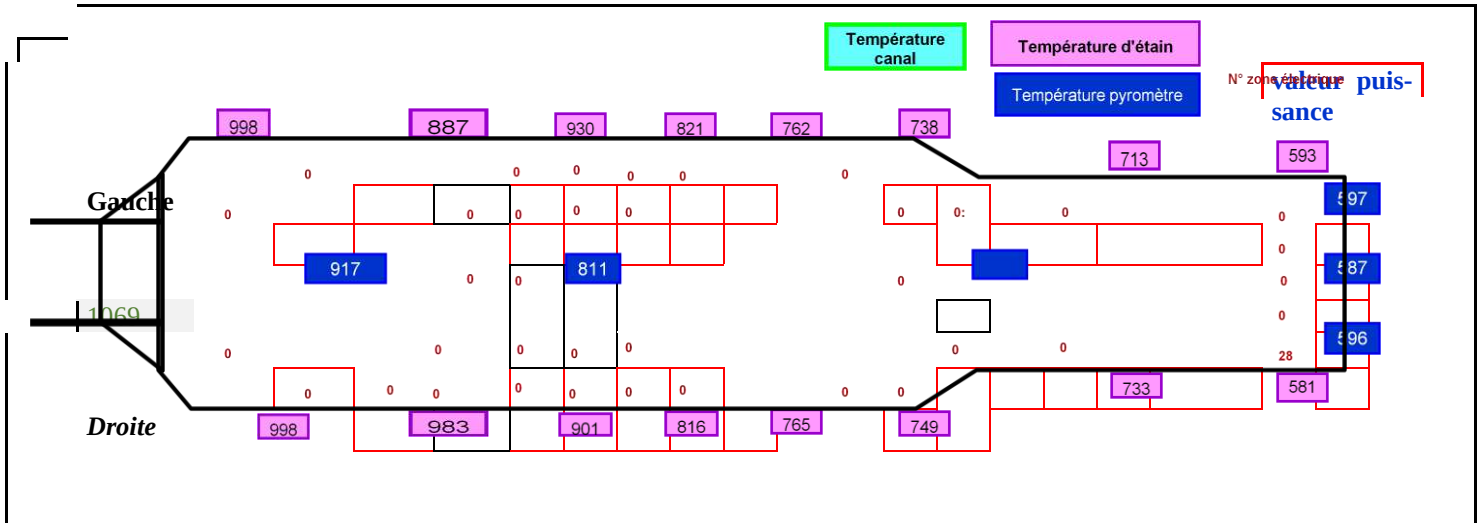


Figure 17: Température d'étain/verre et puissances électriques.

III. PROBLEMATIQUE

Comme toute industrie, il existe des difficultés pour l'obtention de certains produits.

MFG affiche une baisse de rendements lors des campagnes de 3mm d'où notre intérêt pour le sujet. Néanmoins au cours de l'étude, nous avons enregistré en premier lieu un autre problème qui n'est pas hautement considéré et qui semble intéressant de mettre en évidence et de trouver des solutions possibles.

Notre problématique se résume en deux points :

- Causes de la forme non uniforme de l'épaisseur et solutions proposées
- Etude des pertes de production et recommandations pour augmenter le rendement

Nous avons assisté à une opération délicate, le changement de la Tweel régulatrice du débit de verre introduit dans le bain d'étain. Malheureusement, notre stage touchait à sa fin.

1. Causes de la forme non uniforme de l'épaisseur et solutions proposées

L'épaisseur réalisée du 3mm a une courbe convexe et pas rectiligne comme le démontre la courbe des 32 points mesurés :

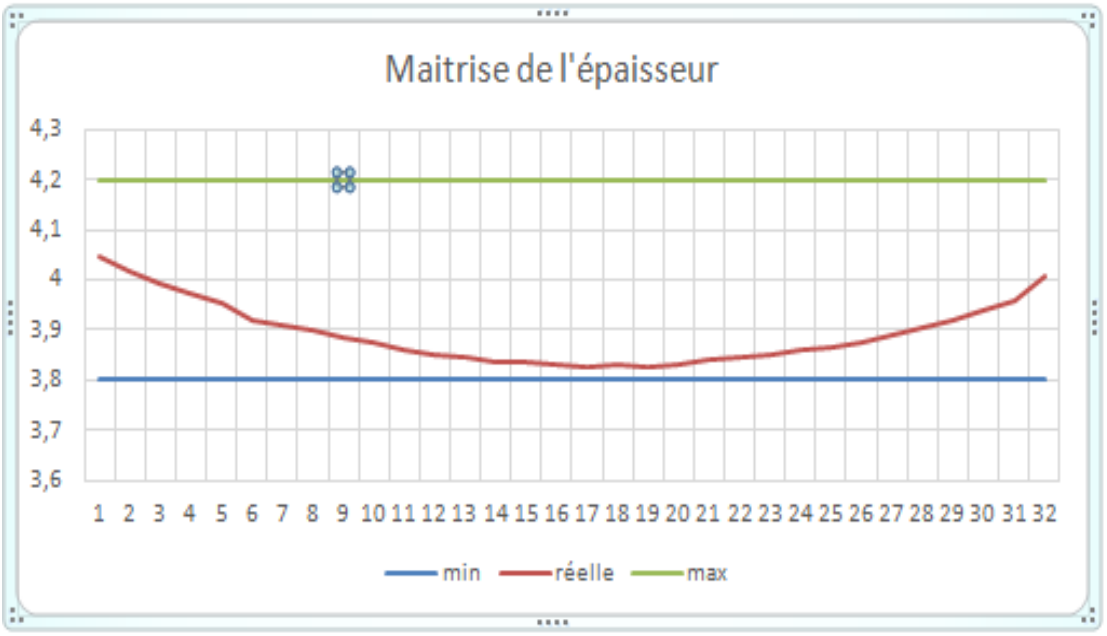


Figure 18: la courbe d'épaisseur de 32 points.

La norme NF/EU 572 relative au verre float, la tolérance de l'épaisseur de 3mm est ±0,2mm. Donc, le produit est conforme vis-à-vis la norme, mais la forme laisse croire à une fragilité du produit au milieu.

L'épaisseur du ruban de verre est déterminée par la force de traction exercée par les rouleaux extracteurs de l'étenderie (épaisseur nominale du milieu) et par l'action éventuelle de des molettes des top-rollers agissant sur les bords supérieurs du ruban de verre.

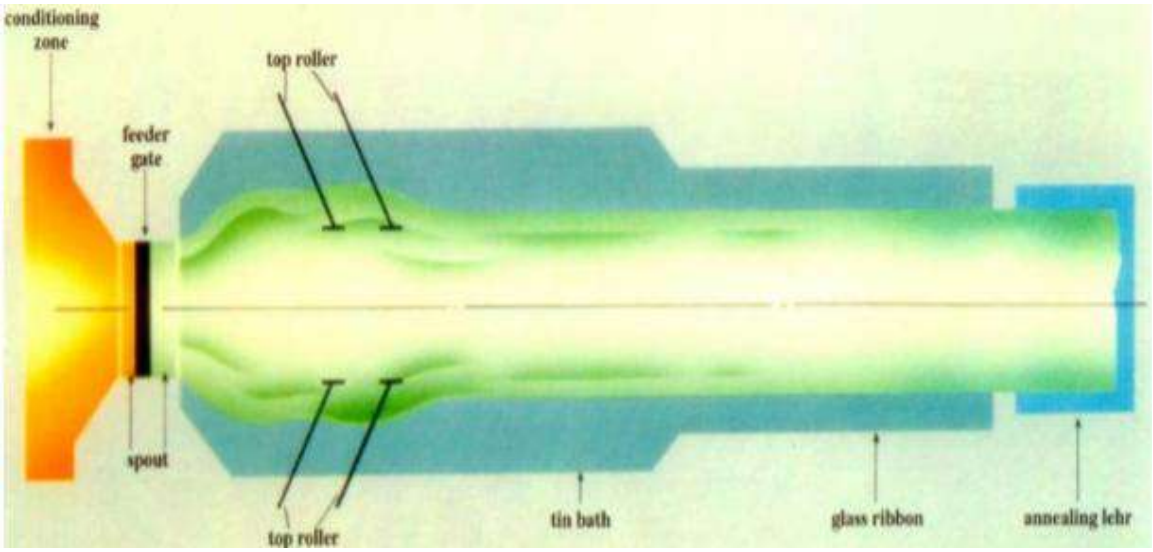


Figure 19 : ruban du verre et formation d'épaisseur.

On voit clairement que l'angle du 1 er TR est négatif. C'est-à-dire une accumulation du verre est provoquée au départ de la fabrication en contradiction avec le principe fondamental du fonctionnement de l'angle lors de la production du verre mince.

N° Top-Rollers		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
Angle	G	(-2)	3.3	5.5	8,0	9,0	7.8	4,0
	D	(-2.5)	3,0	5.5	7.5	7,0	7.2	4,0

Aussi l'écart entre le 1er TR et le 2ème TR est de plus de 5° (de -2° à +3,3°) alors que cet écart est de 2°~3° pour les autres.

Pour augmenter l'épaisseur au milieu, plusieurs propositions :

A. Réajuster les paramètres des top-rollers : pour avoir une uniformité de l'épaisseur du ruban en le milieu et les bords, les paramètres de top-rollers doivent être symétriques.

B. Réduire la température du verre à l'entrée du bain d'étain : généralement appelée la température du canal. Sa baisse permet d'augmenter la viscosité du verre et par conséquent l'épaississement du verre.

C. Remplacer les refroidisseurs à l'entrée du bain d'étain : cela permettrait de concentrer le refroidissement au milieu du ruban de verre.

D. Réduire la vitesse principale : afin d'obtenir un verre plus épais au milieu.

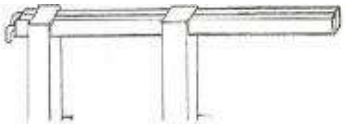


Figure 20 : refroidisseur actuellement utilisé

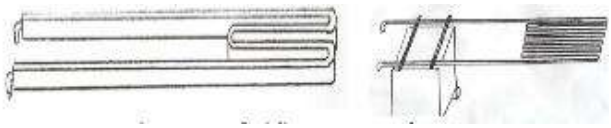


Figure 21 : refroidisseur proposé.

2. Etude des pertes de production et recommandations pour augmenter le rendement

De façon générale, l'arrêt de la production se traduit directement par une perte de vente et donc de rentabilité. C'est pour cette raison qu'il est judicieux de mettre en place des plans d'action pour rattraper tout retard causé par un arrêt.

Durant le stage et lors de la production du 3mm, les données ont été recueillies quotidiennement. Les pertes ont été classées par famille et analysées. Nous donnerons ici les causes et les solutions possibles afin d'augmenter le rendement.

Dans le tableau ci-dessous la campagne de fabrication :

date	Tirée brute	Produit fini		Pertes Qualité		Pertes Casses		Pertes Saturation		perte de bords		Pertes Mauvaise découpe		Pertes maintenance	
15/03/2021	658,349	423,329	64,30%	62,431	9,48%	1,189	0,18%	48,05	7,30%	66,863	10,16%	20,489	3,11%	34,547	5,25%
16/03/2021	658,477	465,003	70,62%	64,838	9,85%	2,149	0,33%	29,35	4,46%	66,863	10,15%	16,159	2,45%	13,321	2,02%
17/03/2021	657,882	489,667	74,43%	60,854	9,25%	2,91	0,44%	11,20	1,70%	66,643	10,13%	15,73	2,39%	6,337	0,96%
18/03/2021	658,998	462,890	70,24%	69,976	10,62%	3,529	0,54%	21,56	3,27%	65,966	10,01%	17,933	2,72%	16,160	2,45%
19/03/2021	663,589	491,242	74,03%	61,363	9,25%	0,82	0,12%	12,77	1,92%	65,221	9,83%	18,175	2,74%	13,138	1,98%
20/03/2021	662,641	365,025	55,09%	176,676	26,66%	0,852	0,13%	16,34	2,47%	66,883	10,09%	19,53	2,95%	14,814	2,24%
21/03/2021	662,688	378,112	57,06%	157,115	23,71%	1,381	0,21%	22,31	3,37%	64,61	9,75%	22,304	3,37%	16,256	2,45%
22/03/2021	663,291	493,257	74,37%	67,327	10,15%	1,639	0,25%	10,88	1,64%	61,319	9,24%	10,487	1,58%	17,185	2,59%
23/03/2021	663,259	512,184	77,22%	54,454	8,21%	1,276	0,19%	9,196	1,39%	62,015	9,35%	13,466	2,03%	10,204	1,54%
24/03/2021	662,908	502,152	75,75%	57,54	8,68%	1,852	0,28%	11,59	1,75%	63,04	9,51%	14,16	2,14%	11,517	1,74%
25/03/2021	663,129	484,893	73,12%	56,8	8,57%	1,92	0,29%	10,21	1,54%	63,53	9,58%	27,083	4,08%	17,097	2,58%
26/03/2021	661,319	473,601	71,61%	62,12	9,39%	3,65	0,55%	19,07	2,88%	64,49	9,75%	24,506	3,71%	12,559	1,90%
27/03/2021	661,659	457,798	69,19%	66,52	10,05%	2,365	0,36%	8,86	1,34%	62,3	9,42%	49,648	7,50%	13,442	2,03%
Moyenne journalière	**661,399**	**461,473**	**69,77%**	**78,309**	**11,84%**	**1,964**	**0,30%**	**17,800**	**2,69%**	**64,596**	**9,77%**	**20,744**	**3,14%**	**15,121**	**2,29%**

Tableau 6 : Tableau global des pertes de production pour la campagne de 3mm.

2.1. Pertes de qualité

Les pertes dues à la qualité sont les pertes dues à la présence de défauts dans le produit fini lors de sa fabrication. Les principaux défauts peuvent être des inhomogène tés ou des inclusions pouvant rendre le produit inutilisable ou en restreindre sévèrement l'utilisation.

- Les inhomogénéités sont des variations de l'indice de réfraction dans le verre, soit des déformations optiques causées par la différence de gradients de température.
- Les inclusions gazeuses qui sont des bulles d'air engendrées par la décomposition lors du processus de fusion.
- Les inclusions solides présentent à l'intérieur du verre, comme les pierres issues de la non-conformité de la granulométrie des matières premières ou la corrosion des réfractaire.

Cette partie de pertes fait l'objet d'étude et recherches par d'autres stagiaires et ne sera pas prise en considération dans notre étude. Avec un bon contrôle des paramètres de fusion et un strict fonctionnement de l'atelier composition, ce taux peut être réduit à un taux inférieur à 5%.

2.2. Pertes de bord

Les pertes de bord sont tout simplement les extrémités droites et gauches de la feuille de verre qui contient des traces laissées par les Top-Rollers lors du formage de l'épaisseur au niveau du bain d'étain. Ces extrémités présentent une énorme quantité de défauts optiques qui ne sont pas tolérés par les normes de fabrication. Ces pertes sont inévitables car elles sont liées au procès et les bords sont broyés et recyclés au niveau de la découpe.

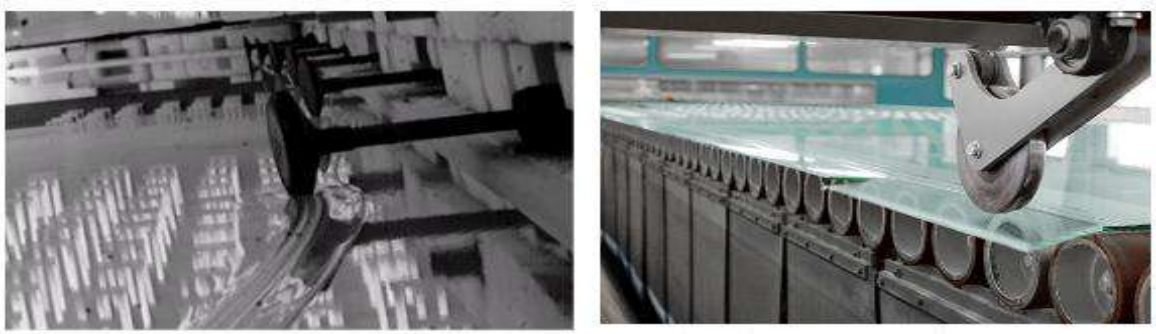


Figure 22 : Génération des bords non-conformes lors du formage et leur élimination lors de la découpe.

Recommandations :

La découpe de bords se fait en deux temps : brute (comme démontré dans le photo) et fine (50mm de chaque côté) pour l'obtention de la largeur utile de 3210mm. Comme l'épaisseur de 3mm est mince et par conséquent fragile, nous proposons de réaliser une seule découpe de bords.

La ligne produit en moyenne journalière une longueur de 25.000Km de ruban. Un gain de 100mm nous donne un tonnage journalier de :

25.000Km x 100mm x 3mm (épaisseur) = 7,5tonnes, soit un bénéfice journalier moyen de 270.000 dinars.

Le taux de perte de bord sera rabaissé à 8,5%. Pour garder la même tirée, l'ajustage des paramètres des top-rollers est requis.

Avant d'entamer les autres pertes, il faut rajouter que les bords ne sont pas uniformes en production de 3mm. Les bords sont principalement affectés par les paramètres des top-rollers. Cette irrégularité influe considérablement sur le calcul de la tirée brute de production journalière.

La tirée est calculée par la formule suivante **: $T = 3.6 \times L_b \times E_{moy} \times V_e$**

- **L_b :** largeur brute
- **E_{moy} =** épaisseur moyenne.
- **V_e =** vitesse d'entrainement principale.

Pour avoir plus de précision sur le calcul de la tirée, celle-ci est calculée par pesage des bords. La méthodologie est détaillée ci-dessous :

2.2.1. Calcul de la tirée brute par la méthode de pesage des bords

Lors du prélèvement d'un échantillon pour le contrôle qualité d'un (01) mètre de largeur, on coupe les bords séparément et on les pèse et on mesure les cotations.

Les données :

1	Largeur brute	LB	3,62 m
2	Largeur nette	LN	3,21 m
3	Largeur bord droit	lbd	23 cm
4	Largeur bord gauche	lbg	24,2 cm
5	Longueur bord droit	Lbd	110 cm
6	Longueur bord gauche	Lbg	110 cm
7	Poids bord droit	Pbd	2,412 kg
8	Poids bord gauche	Pbg	2,254 kg

Les différentes épaisseurs de la largeur nette :

e 1	e 2	e 3	e 4	e 5	e 6	e 7	**moyenne**
3,109	2,964	2,885	2,883	2,89	2,983	3,102	**2,974**

a) Calcul de l'épaisseur moyenne du bord droit :

$$\mathbf{E_{moyD}} = \frac{\boldsymbol{poids\ de\ bord\ droit} * \mathbf{10000}}{\boldsymbol{largeur\ de\ bord\ droit} * \boldsymbol{longueur\ de\ bord\ droit}\ * \mathbf{2,5}}$$

E_{moyD} =3,813mm

b) Calcul de l'épaisseur moyenne du bord gauche :

$$\mathbf{E_{moyG}} = \frac{\boldsymbol{poids\ de\ bord\ gauche} * \mathbf{10000}}{\boldsymbol{largeur\ de\ bord\ gauche} * \boldsymbol{longueur\ de\ bord\ gauche}\ * \mathbf{2,5}}$$

E_{moyG} =3,387mm

c) Calcul de l'épaisseur total moyenne en mm :

$$\mathbf{E_{Tmoy}} = \frac{(\mathbf{E_{moyD}} \times \mathbf{L_{bD}}) + (\mathbf{E_{moy}} \times \mathbf{L_N}) + (\mathbf{E_{moyG}} \times \mathbf{L_{bG}})}{(\mathbf{L_{bD}}\ \mathbf{x}\ \mathbf{L_N}\ \mathbf{x}\ \mathbf{L_{bG}})}$$

E_{Tmoy} = 3,106mm

d) Calcul du coefficient de réglage de la tirée K :

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{E_{Tmoy}}}{\mathbf{E_{moy}}}$$

K =1,044

e) Calcul du tonnage par la méthode de pesage :

Le calcul du tonnage est une opération courante sur une ligne float. Il est intéressant de donner la différence avec et sans coefficient K.

$T=3.6 \times L_b \times E_{moy} \times V_e$	E_{moy} = moy (e1+e7+(e4)^2)	2,994	**667,652**
$T = (3.6 \times L_b \times E_{moy} \times V_e)$ .K	E_{moy} = moyenne plusieurs points	2,974	**675,890**

Soit un écart journalier moyen de 675,890-667,652**= 8,238 T/j**. La campagne du 3mm a duré 16jours. Donc l'écart total est de 8,238 x 16 **= 131,809 tonnes.**

Interprétation des résultats :

Même si le bord gauche est plus large que le bord droit, son poids cependant est plus faible. Cette anomalie est le fruit de décalage énorme dans les impressions des top-rollers sur les deux côtés.

N° Top-Rollers		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Impression	G	(-11.3)	(-2.7)	3.4	(-24)	(-23.5)	(-31.6)	(-14.8)	
	D	(-10.1)	(-6.8)	(-7.2)	(-12)	(-17.5)	(-16)	(-11.5)	

Recommandations :

L'étalonnage des top-rollers doit être réaliser avec une société spécialisée ou avec la société qui a fourni l'équipement. L'équipe de maintenance de MFG suivra les démarches comme une formation sur site.

3. Analyse des pertes

3.1. Pertes dues au déclassement du produit fini

Le produit fini est contrôlé avant et après découpe de ce dernier. Si avant on vérifie la quantité et la taille des défauts afin de les minimiser dans le produit conforme et validé, la vérification finale concerne principalement la qualité de découpe et d'autres aspects physique, régit par la norme NF/EN 572-8.

Le déclassement du produit fini se décompose en les suivantes :

- Mauvaise découpe
- Manque de poudre intercalaire

Ces facteurs peuvent être séparés ou cumulés.

3.1.1. Pertes dues à la mauvaise découpe

Elle peut être causée par un mauvais recuit, donc augmentation des contraintes résiduelles qui accentuent la difficulté, soit à un problème au niveau de la section étenderie. Aussi elle peut être générée dans la section de découpe en cas de défaillance des outils de coupe.

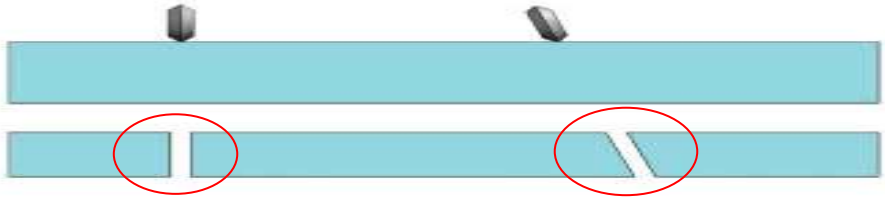


Figure23: mollette conforme .



Figure 24 : mollette usée, logis dégradé.

Une roue perpendiculaire et bien fixée dans son logis donne une performance de coupe idéale. Avec l'usure, un vide se crée dans le logis et donne inévitablement une mauvaise qualité de découpe. Le produit fini risque d'être déclassé.



Recommandations :

- Vérifier les paramètres de l'étenderie en permanence
- Changer les molettes de découpe tout en optimisant leur fonctionnement. Selon le fournisseur des outils de découpe, l'utilisation moyenne est de 3000Km. MFG utilise les molettes dans une moyenne de 5000Km avant de les changer.

3.1.2. Pertes dues au manque de poudre intercalaire

Une poudre très fine est utilisée pour éviter le collage des feuilles lors de dépilement chez les clients. La norme de l'étalement est de 200~400mg/m^2.

MFG fonctionne dans la limite inférieure ce qui favorise le collage des feuilles et le déclassement du produit fini en cas de bouchage de quelques injecteurs. Aussi, la machine à un seul moteur et compresseur qui injecte la poudre sur toute la largeur du ruban de verre. Si la machine n'est pas bien entretenue, le manque de poudre se manifeste rapidement.

Recommandations :

Il faut étudier la possibilité d'avoir une installation à deux (02) compresseurs travaillant en redondance.

En faisant cela, cette perte peut être réduire à moins de 1% comme le dicte la performance de la ligne de production. Soit un gain journalier moyen en rendement de 2,14%, équivalent à 14,160tonnes. Un bénéfice monétaire moyen journalier de **509 742DZD.**

3.2. Pertes de saturation

Les pertes de saturation c'est le broyage et recyclage des plaques de verre conformes afin d'éviter l'encombrement de la ligne qui pourrait engendrer l'interruption du ruban continu du verre (problème plus grave). La saturation est causée par les faits suivants séparés ou en cumulés :

- Retard d'emballage et de stockage
- Impossibilité de production du format PLF
- Problème de maintenance des engins d'évacuation

Le produit fini est évacué de l'empileuse par des machines appelées HUBTEX. Ensuite, il est conditionné manuellement dans des caisses en bois sur des tables d'emballage.

Tout problème sur l'une des machines (Hubtex, table) engendre inévitablement une perte de production.



Figure 25 : production stockée en vrac et emballée.

Si le format PLF n'est pas produit, il y aura saturation sur la ligne de découpe et une perte de production. Ce phénomène est augmenté lors de la fabrication du verre mince (3mm) suite à l'augmentation de la vitesse de la ligne de découpe. La proportion de fabrication du format PLF est de 3% selon le tableau ci-dessous. Ce faible taux est imputé à l'ondulation du ruban au niveau du recuit à cause de l'augmentation de l'épaisseur des bords aux extrémités.



Figure 26 : évacuation et commercialisation de PLF.

Recommandations :

- Vérifier périodiquement les équipements, les empileuses, les tables et les Hubtex avant la production de 3mm.
- Produire le format PLF à un taux minimal de 30% (information de l'expérience de l'effectif de MFG)
- Stocker en vrac et le conditionner après afin de libérer les empileuses.



Figure 27: stockage en vrac de caisses DDLF.

Le taux standard de la saturation en production de 3mm est de 1% vu que la vitesse de la ligne est augmentée. Soit un gain de 1,69% équivalent à un bénéfice journalier moyen de **402 553DZD**.

3.3. Pertes dues aux problèmes de maintenance

Le taux standard des pertes dues aux problèmes de maintenance de doit ne pas dépasser 1%. Le plus grand problème est l'arrêt des Hubtex, machines d'évacuation du verre de l'empileuse et/ou de stockage. Ces arrêts répétés sont le résultat de manque de pièces de rechange.

Avec la crise sanitaire covid-19, les sociétés européennes ont limité leur fonctionnement suite au confinement forcé. Ceci a eu un effet négatif sur l'acquisition des pièces de rechange nécessaires au bon fonctionnement de la ligne.

Nous proposons d'étudier et d'investir au changement de ces machines par des chariots élévateurs, plus disponibles ainsi que leur PDR (pièces de rechange). Ces moyens sont utilisés de plus en plus dans les autres sociétés.

Les arrêts réduits, soit un gain journalier moyen minimal de 1,29% équivalent à un bénéfice journalier moyen de **307 274DZD**.

3.4. Pertes dues aux casses

Les pertes de casses c'est le manque en rendement causé par la rupture du ruban lors du recuit. Elles sont causées soit par les défauts de grandes dimensions, soit par les

perturbations du régime thermique. La valeur de 0,30% lors de la production du verre mince n'influe pas sur le rendement global. Elle ne sera pas étudiée.

3.5. Pertes dues aux prélèvements

Les prélèvements sont inévitables pour le contrôle du produit fini. Leur taux de 0,21% est très faible et n'influe pas sur le rendement journalier.

IV. RECOMMANDATIONS GLOBALES

Les recommandations pour améliorer le rendement lors de la production de 3mm reposent sur deux volets distincts mais complémentaires. Le premier c'est avoir une uniformité de l'épaisseur sur toute la largeur du ruban de verre. Pour ce faire, il faut :

1. Étalonnage des top-rollers pour éviter les grands décalages entre les côtés gauche et droit et contribuer ainsi à maitriser davantage le ruban de verre. Après l'étalonnage, un ré-ajustage des paramètres des top-rollers est nécessaire.

2. Réduire la température du canal au niveau du four ou celle du verre à l'entrée du bain d'étain en modifiant le positionnement des refroidisseurs à l'entrée du bain d'étain et/ou en changeant leur conception afin de concentrer le refroidissement au milieu du ruban de verre.

3. Réduire la vitesse principale afin de laisser un temps suffisant pour un étalement uniforme et homogène du verre dans le bain d'étain.

Concernant le deuxième volet –amélioration du rendement des campagnes de 3mm nous recommandons ce qui suit :

4. Réaliser une seule découpe de bords vue que l'épaisseur produite est assez fragile et donc facilement cassable.

5. Vérifier les paramètres de l'étenderie en permanence.

6. Optimiser la consommation des molettes de découpe tout en s'assurant de ne pas doubler leur temps de fonctionnement.

7. Acquérir une machine à poudre avec deux (02) compresseurs travaillant en redondance.

8. Augmenter la quantité de poudre tout en restant dans la norme. Travailler dans la limite inférieure risque de causer des déclassements du produit fini.

9. Vérifier périodiquement les équipements, les empileuses, les tables et les Hubtex surtout avant la production de 3mm.

10. Produire le format PLF à un taux minimal de 30% afin de permettre à l'automate de bien gérer la circulation des plaques de verre dans la ligne de découpe et éviter la saturation.

11. Stocker en vrac et le conditionner après afin de libérer rapidement les empileuses.

12. Réduire les temps d'arrêt de l'équipement par une maintenance planifiée et éviter les interventions que lors des pannes (maintenance curative)

13. Étudier et investir pour un remplacement des machines existantes par des chariots élévateurs, plus disponibles ainsi que leur PDR. Ces moyens sont utilisés de plus en plus dans les autres sociétés.

14. Améliorer la formation des employés car le manque de compétences et de savoir-faire c'est le poison de toute société.

V. LES DEFAUTS DU VERRE FLOAT

1. Méthode d'analyse au microscope électronique

Le microscope est un instrument d'optique qui permet d'examiner des objets ou des éléments invisibles ou difficilement visibles à l'œil nu, grâce à une lentille. Cette méthode permet d'analyser les défauts de verre durant la production, il faut juste passer les échantillons dans le microscope pour déterminer la nature de défaut.

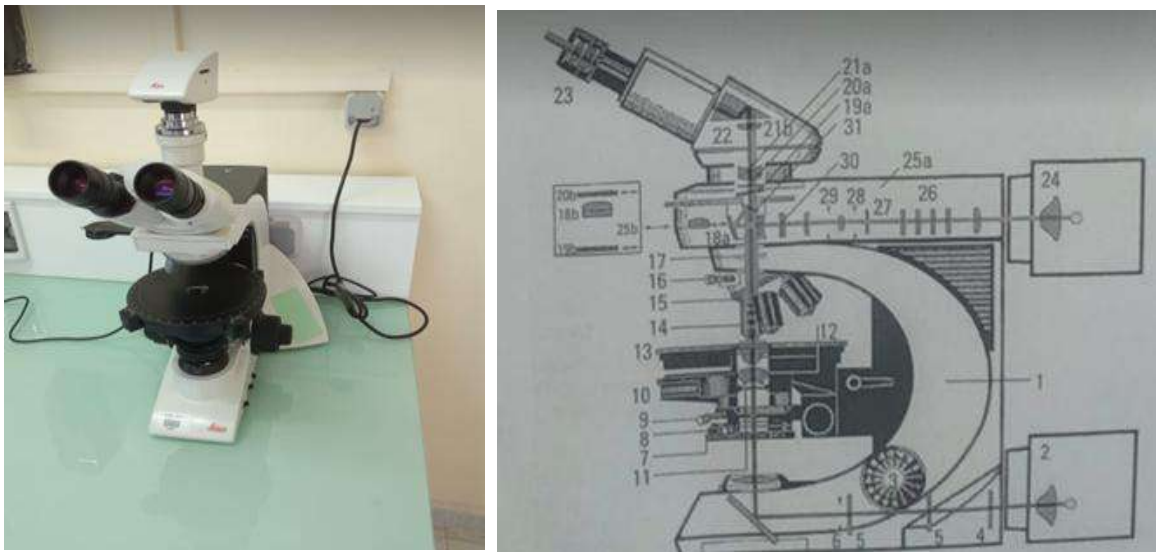


Figure 28 : structure de microscope optique.

1-Statif (armature principale), 2 - la source lumineuse de transmission (12 volts 100W); 3-Mise au point macro et micro, 4- filtre à demeure léger; 5 - filtre commutable léger (3 au minimum); 6- Diaphragme de champ; 7-polariseur tournant; 8-Monture pour lame, ct/4; 9-Objectif de condensation; 10-Barillet avec lame. et W4; 11-Diaphragme d'ouverture; 12-Lentille du condensation; 13- table objective de rotation; 14 -Objectifs centrales (objectifs de lumière polarisée); 15-Revolver porte objectif à S position; 16 - Monture pour compensateur et prismes de; 17- Monture pour l'analyseur, 18 -Objectifs et trou d'épingle de Bertrand; 19 - Analyseur; 20- Dépolariseur; 21-Système de lentille de tube ; 22-Tube avec prismes de déviation ; 23- Oculaire avec réticule en croix ; 24-Source de lumière de réflexion (12 volts 100) Halogène, ou Hg ou Xe; 25-1luminateur (Axe de lumière réfléchie) ; 26-filtre léger (4 position); 27- Disque de diffusion ; 28-Diaphragme d'ouverture 29-Diaphragme de champ centrale; 30- polariseur; 31 - Réflecteurs de Smith.

2. Définition d'un défaut de verre

Un défaut du verre est un défaut du matériau fini apparus lors de sa fabrication. Les principaux défauts peuvent être des inhomogénéités ou des inclusions. Les défauts du verre peuvent rendre le produit inutilisable ou en restreindre sévèrement l'utilisation.

3. Type des défauts du verre float

Il existe deux types principaux de défauts du verre float :

3.1. Défaut d'aspect

Défaut qui altère la qualité d'aspect du verre. Ils incluent les défauts ponctuels et les défauts linéaires ou étendus.

3.2. Défaut ponctuel

Le défaut ponctuel c'est un noyau généralement accompagné par un halo de verre déformé. Les défauts ponctuels peuvent être des inclusions présentent à l'intérieur du verre par exemple bulle, pierre, tache...etc.

- Halo: surface localement déformée, généralement autour d'un défaut ponctuel.
- Inclusions gazeuses (cavité remplie de gaz) dans le verre. Ces inclussions présentent presque toujours un aspect brillant et de four électrique. Le terme pucey désigne les bulles dont la dimension est inférieure à 5,5 mm et le terme « bouillons » s'applique à toutes les inclusions de longueur supérieure å 6 mm.

3.3. Pierres (inclusions solides)

Résidus opaques de matière première ou réfractaire non dissoute au cours du procédé de fusion. Il existe différents types de pierres :

- Pierre de Quartz.
- Pierre de Zircon.
- Pierre de Corindon.
- Pierre de Diopside.
- Pierre d'Oxyde d'Etain.
- Gouttelette du verre fondu.
- Pierre de brique réfractaire associée à l'Etain métallique.
- Pierre du verre cristallisé.
- Pierre d'argile réfractaire.
- Pierre de Silice réfractaire.

3.4. Tâches

- Tache d'Etain inferieure.
- Tache d'Oxyde d'Etain (traces des rouleaux).

3.5. Les défauts linéaires ou étendus

Défauts qui se trouve sur ou dans le verre, sous forme de dépôts, marque de gifles, impressions, rayures, ect... Défauts qui occupent une longueur ou surface étendue. La rayure est toute marque ou fissure sur la surface et qui semble avoir été faite par un instrument tranchant (entaille produite par un cops dur). Les diverses espèces de rayures apparaissant sur le verre sont accidentelles.

3.6. Défaut optique

Défaut qui provoque des déformations de l'apparence des objets observés au travers de la feuille du verre. Il existe deux types de défauts optiques linéaires et locaux (Knot).

4. Les causes probables et les actions correctives de chaque défaut

4.1. Les bulles

4.1.1. Les causes probables

- Perturbation des paramètres du four, notamment celle d'affinage.
- La fluctuation (changement de niveau de verre fondu dans le four qui fait varier l'écoulement de verre, et l'air dissout dans le liquide de verre ne peut être évacué).
- Pression très élevé au niveau de la partie de refroidissement (zone d'affinage), le gaz (bulle) ne peut être évacué.
- L'atmosphère du point chaud est plus oxydée de manière que l'air (bulle) ne peut être évacué.
- Température de la fusion est faible ce qui augmente la viscosité de liquide de verre de manière que l'air (bulle) ne peut être évacue.
- Impureté de l'aire de dilution par de la poussière, cette dernière en contact avec la surface u verre fondu provoque des bulle.
- Un excès de sulfate clans le dosage des matières premières crée des bulles de sulfate.
- Fissuration des briques réfractaires provoquant la pénétration de l'air dans le verre fondu.
- Vitesse des malaxeurs du verre fondu assurant 1'homogénéité est très élevé provocant la création de bulles

4.1.2. Les actions correctives :

- 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 et niveau du liquide et assurer 1'enfournement régler du mélange vitrifiable.
- Vérifier l'atmosphère neutre de la flamme du barilleur au point chaud.
- Vérifier le dosage de sulfate dans le mélange vérifiable
- Assurer 1étanchèité du four de fusion.
- Vérifier la vitesse des malaxeurs du verre fondu .

4.2. Pierre de Quart:

4.2.1. Les causes probables :

- Fusion incomplète de la silice suite à une perturbation du régime thermique du four.
- Présence des impuretés au niveau de la matière première et calcin.

4.2.2. Les actions correctives

- Stabiliser le régime thermique du four.
- Renforcer (entretenir) les parois du four.
- Stabiliser le niveau du verre fondu.

4.3. Pierre de Corindon

4.3.1. Les causes probables

Erosion de la brique réfractaire de Mullite et/ou celle d'Argile à l'entrée du four suite à la perturbation du:

- Régime thermique du four.
- Niveau du verre fondu.
- Le niveau des matières premières å l'enfournement est très haut.

4.3.2. Les actions correctives

- Stabiliser le régime thermique du four.
- Renforcer (entretenir) les parois du four.
- Stabiliser le niveau du verre fondu.
- Ajuster le niveau des matières premières à l’enfournement.

4.4. Pierre de Diopside

4.4.1. Les causes probables

- Fusion incomplète de la dolomie suite å un gros grain dans la poudre de dolomie ou plus de poudre fin.

- Le liquide froid du verre cristallisé à 1'angle mort entre dans le reflux de formage. Non rationnel du régime de l'abaissement de température et refroidissement du liquide du verre.

4.4.2. Les actions correctives

- Contrôler strictement la granulométrie de limite supérieure et inférieure de poudre de dolomie.
- Eviter le liquide froid de verre de bord et l'angle mort entre dans le reflux du formage.
- Maintenir le régime rationnel de l'abaissement de température de refroidissement de liquide de verre.
- Renforcer (entretenir) les brique de la voute de four.

4.5. Pierre d'Oxyde d'Etain

4.5.1. Les causes probables

- Perturbation des paramètres du bain d'étain.
- Oxydation d'Etain à l'entrée du bain "canal".

4.5.2. Les actions correctives

- Assurer l'étanchéité du bain d'Etain.
- Stabiliser le régime thermique du bain d'Etain.
- Vérifier la pureté des gaz de protection (N_2, H_2).

4.6. Pierre d'étain

4.6.1. Les causes probables

- Perturbation des paramètres physiques du bain d'Etain.
- Oxydation d'Etain à l'entrée du Canal
- Contamination des gaz de protection du bain d'Etain.

4.6.2. Les actions correctives

- Stabiliser les paramètres physiques du bain d'Etain.
- S'assurer de I 'étanchéité du bain.
- S'assurer de la qualité des gaz de protection.

4.7. Pierre de Slice réfractaire

4.7.1. Les causes probables

- Dégradation de la brique réfractaire siliceuse suite aux perturbations des paramètres du four.

4.7.2. Les actions correctives

- Stabiliser le régime thermique du four.
- Renforcer (entretenir) les parois du four.

4.8. Résultats de test par microscope :

Après analyse de 42 échantillons dans le laboratoire central de MFG, nous avons pu identifier clairement 10 défauts suivants, sans compter les bulles d'air facilement identifiables :

échantillon	Type de défaut
1	Bulle d'air
2	Pierre corindon
3	Pierre quartz
4	Pierre corindon
5	Déformation optique
6	Pierre corindon
7	Déformation optique
8	Bulle d'aire face intérieur
9	Bulle d'air
10	Oxyde d'étain
11	Bulle d'air
12	Oxyde d'étain
13	Tache d'eau
14	Pierre corindon
15	Pierre quartz
16	Bulle d'air
17	Bulle d'air
18	Pierre quartz
19	Oxyde d'étain
20	Déformation optique
21	Pierre quartz

échantillon	Type de défaut
22	Bulle d'air
23	Pierre de zircon
24	Tache d'étain inferieur
25	Gouttelette de verre fondu
26	Pierre de diopside
27	Pierre de quartz
28	Pierre de zircon
29	Bulle d'air
30	Déformation optique
31	Pierre corindon
32	Pierre de diopside
33	Pierre de quartz
34	Bulle d'air
35	Pierre de quartz
36	Tache d'étain inferieur
37	Oxyde d'étain
38	Pierre corindon
39	Déformation optique
40	Pierre de quartz
41	Bulle d'air
42	Pierre de diopside

Bulle d'air	Déformation optique	Pierre de zircon	Pierre quartz	Pierre corindon	Pierre de diopside	Gouttelette de verre fondu	Tache d'eau	Oxyde d'étain tache d'étain inférieure
10	5	2	8	6	3	1	1	6
23,81%	11,90%	4,76%	19,05%	14,29%	7,14%	2,38%	2,38%	14,29%
35,71%		38,10%			9,52%			

Les défauts pris comme échantillons révèlent ce qui suit :

- Les bulles d'air sont les plus dominants des défauts du four avec 23,81%. Avec la déformation optique, le taux est de 35,71%. Ce qui démontre une mauvaise fusion des matières premières et/ou un mauvais affinage du verre.

- Les pierres de zircon, quartz et corindon avec un taux de 38,10%, stipule une corrosion des briques en AZS (alumine-zirconium-silice). C'est les briques qui constituent la paroi du four en contact avec le verre.

- Les pierres de diopside et les gouttelettes du four, apparaissent généralement quand la matière première présente un taux élevé de fines particules.

- La tâche d'eau, qui s'est accentue avec le temps a été localisée au niveau de l'étenderie, ou une fuite d'eau au niveau du pyromètre optique a été détectée et réparée

- Les défauts du bain d'étain représentent moins de 15% des défauts du four, principalement due à la contamination du bain d'étain lors des réglages des paramètres ou on est obligés d'ouvrir des trappes d'opération (side-sealing). La qualité des gaz de protection est contrôlée en permanence au niveau de MFG.

CONCLUSION GENERALE

Le verre float est vendu, en sortie des usines de verre plat, à un prix au-dessous des prix de l'acier et de l'aluminium. L'amélioration de la productivité permet une baisse continue du coût de production. C'est cette baisse continue du coût de production du verre plat qui explique la large utilisation de ce matériau notamment dans le bâtiment et dans l'automobile.

Le travail effectué au niveau de la MFG nous a permis de:

- Suivre le processus de fabrication du verre float sur les différentes lignes depuis la matière première jusqu'au produit fini.

- Identifier les défauts du verre float par observation au microscope optique et définir leurs causes dans les différentes étapes de production. Sur les 18 défauts existants, 10 ont été détectés.

- Déduire les actions correctives afin de réduire le nombre de défauts.

Trouver « des bulles » comme étant le défaut dominant sur les 42 échantillons étudiés. Par comparaison avec les autres types de défauts, la bulle d'air présente de nombreuses sources de formage: parmi lesquelles on cite:

- Perturbation des paramètres du four.
- Faible température de fusion
- Excès de sulfate.
- Fissuration des briques réfractaires.
- Elévation de la vitesse des malaxeurs.
- Collecter les défauts, leurs causes et actions correctives existants dans la classification adoptée par la MFG.

En appliquant les recommandations émises dans ce mémoire, MFG peut améliorer le rendement des campagnes de 3mm de **6,39%** représentant un tonnage journalier moyen de 42,622 tonne.

Une tonne de verre coûte en moyenne 36 000 DA. Donc un gain monétaire journalier de **1 534 366 DZD/jour.**

La campagne de 3mm représente 26% de production annuelle MFG, soit 95 jours de l'année. Un gain annuel estimé à **145 764 846 DZD**.

Références bibliographiques :

[1]. Université Aboubekr Belkaid- faculté des sciences de l'ingénieur « science des matériaux de construction ».

[2] Le journal du CNRS,n°181,février 2005.

[3] NARAY-SZABO I., LADIK J., Strength of silica glass, Nature 188, 226–227 (1960).

[4] CSTC «le verre et les produits verrières»1999.

[5] European Glass Industry, Janvier 1998.

[6] Tanqram-Article « Float Glass Production Process».

[7] Matière et Beauté, Verre-Reflets de feu, A.Boucq, G.Quinif, Y.Quinif, Faculté polytechnique de Mons, 2004

[8] J. Zarzycki, "Les Verres et l'Etat Vitreux", Edition Masson (Paris), (1982).

[9] Schoize H, 'Le verre, nature, structure et propriétés". Institut du verre Paris, (1980).

[10] W.H. Zachariasen, "The atomic arrangement in glass", J. Am. Chem. Soc., 54, (1932)3841-3851.

[11] Yourgalss, «Le verre QUID»Articel-2007.

[12] S.R. Elliott, « Physics of amorphous materials », Longman, New-York (1989).

[13] ZARZICKI. R. : Le verre et l'état vitreux. Edition Masson 1982.

[14] SHELBY, J.E. Introduction to glass science and technology. 1997. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.

[15] Yourgalss, «Le verre QUID»Articel-2007.

[16] Glass Trosch Holding AG, Conseil,Bützburg « Le verre et ses applications»2013,4e édition .

[17]. B. Dubois, Thèse, Université de Bordeaux I, (1984).

[18]. M. Imakoa, H. Hasegawa, Phys. Chem. Glasses, 21 2 (1980) 67.

[19]. C. J. Prebende, J. Cottrant, B. Dubois, J. J. Videau, J. Portier, Revue de Chimie Minérale, t23 (1986) 231.

[20]. M. Poulain, M. Poulain, J. Lucas et P. Brun : Mat. Res. Bull. 10, 243-246 (1975).

[21]. J. Portier, Les matériaux non cristallins.

[22]. M. Poulain, Glass Systems and Structures, A Comyns ed, Wiley et Sons (1989) 11-48.

[23]. J. J. Videau, J. Portier, B. Piriou, Revue de Chimie Minérale, t16 (1979) 393.

[24]. J. J. Videau, J. M. Dance, J. Portier, B. Dubois, Revue de Chimie Minérale, t23 (1986)789
[25]. Jerzy Zarzycki, Vch, New York 1991 Materials Science and Technology Volume 9, Glasses and Amorphous Materials.

[26]. K.A.C.Richardson, J, M.Mckinley, B.Lawrence, A.Villeneuve, Comparison of nonlinear optical properties of sulfide glasses in bulk and thin film form. A être publie dans Opt .mat (1997)

[27] Nasir BICHARI : RENFORCEMENT MECANIQUE D'UN VERRE SODO-CALCIQUE PAR TREMPE THERMIQUE .Mémoire de Magister de l'université de Boumerdes 2007.

[28] James Barton et Claude Guillemet, « Le verre, Science et technologie » 2005.

[29] J-C Lehmann, Bulletin, *verre et produits verriers d'aujourd'hui et de demain de* la S.E.P(150), juillet-Aout 2005.

[30] MARTIN Benjamine et SAJE Stéphane,« Le recyclage du verre » Article-2004.

[31] CSTC «le verre et les produits verrières»1999.

[32] Saint-Gobain Glass,« Definition von Glass» Beitrag-2005.

[33] Heinz G. Pfaender « Schott guide to glass » 1996, 2e edition.

[34] N. EL JOUHARI, Cour chimie minérale appliquée « Introduction à la technologie du verre ».