

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

Université Blida 1

Faculté de technologies

Département de Génie des Procédés



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN GENIE DES PROCEDES DES MATERIAUX

Intitulé du mémoire

**Étude comparative des propriétés de résistance à la corrosion de
verre à couche (Medi Solaire Dark bronze14) avant et après la
trempe thermique**

Encadré par :

Mr BOURAS Omar

Mr HABEL Abdelouahab

Présenté par :

MANSOURI Romaissa

BOUHAMIDI Nerdjes

Année Universitaire :

2023/2024

Résumé

Cette étude comparative a pour objectif d'analyser et de comparer les propriétés de résistance à la corrosion d'un verre à couches de contrôle solaire avant et après trempe thermique. À travers une série de tests.

Nos résultats ont mis en évidence que le verre trempé présentait une meilleure résistance à la corrosion par rapport au verre non trempé. La trempe thermique semble améliorer non seulement la résistance mécanique du verre mais aussi sa capacité à résister aux attaques chimiques. D'autre part, les échantillons de verre non trempé ont montré des signes de corrosion plus rapidement, notamment une altération des couches plus significative.

Mot clés : Verre à couche, la trempé thermique, résistance à la corrosion

ملخص

تهدف هذه الدراسة المقارنة إلى تحليل ومقارنة خصائص مقاومة التآكل لنوعين من الزجاج المطلي: المقسى وغير المقسى. من خلال سلسلة من الاختبارات.

أظهرت نتائجنا أن الزجاج المقسى يتمتع بمقاومة أفضل للتآكل مقارنة بالزجاج غير المقسى. يبدو أن التقسية الحرارية لا تعمل على تحسين القوة الميكانيكية للزجاج فحسب، بل أيضًا قدرتها على مقاومة الهجوم الكيميائي. من ناحية أخرى، أظهرت عينات الزجاج غير المقسى علامات التآكل بسرعة أكبر، بما في ذلك تغيرات أكثر أهمية في الطبقات.

الكلمات المفتاحية: الزجاج المطلي، التبريد الحراري، المقاومة للتآكل

Abstract

This comparative study aims to analyze and compare the corrosion resistance properties of solar control coated glass before and after thermal tempering treatment Through a series of tests.

Our results showed that tempered glass had better corrosion resistance compared to non-tempered glass. Thermal tempering appears to improve not only the mechanical strength of glass but also its ability to resist chemical attack. On the other hand, untempered glass samples showed signs of corrosion more quickly, including more significant alteration of the layers.

Key words : Coated glass, thermal quenching , corrosion resistance



REMERCIEMENTS

Nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour achever ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant Pr.Omar Bouras, pour sa disponibilité, ses aides précieuses, ses conseils judicieux et notamment ses critiques constructives qui nous ont permis d'évoluer et de mener à terme ce présent mémoire.

Nous tenons aussi à remercier les Ingénieurs de contrôle qualité de l'entreprise MFG, pour sa patience, sa disponibilité, l'aide qu'il a fourni et les connaissances qu'il a su nous transmettre.

Nous tenons ainsi à remercier Madame DJILALI Souhila, pour leur soutien technique, leur professionnalisme et leurs conseils au niveau du laboratoire central.

A monsieur HABEL Abdelouahab, chef laboratoire PSI et à madame BOUDECHICHE Hala, ingénieur laboratoire de verre à couche.

Nous exprimons nos vifs remerciements aux enseignants de l'université Saad Dahleb Blida pour la formation de qualité qu'ils nous ont délivré tout au long de notre cursus.

Enfin, un grand merci à nos parents, nos familles et nos amis pour leur amour, leurs conseils ainsi que leur soutien inconditionnel.



DÉDICACES

Je dédie ce projet

Avec tous mes sentiments de respect, avec l'expérience de ma reconnaissance, je dédie ma remise de diplôme et ma joie.

Mon paradis, à la prunelle de mes yeux, à la source de ma joie et mon bonheur, ma lune et le fil d'espoir qui allumer mon chemin, ma moitié. Maman.

À celle qui a fait de moi une femme, source de ma vie, de mon amour et de ma tendresse. A mon soutien qui a toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, à mon père le Prince, que Dieu ait pitié de lui.

À mes frères **FAOUZI** et **KHALED** pour l'amour qu'il me réserve.

À mes sœurs **MANEL** , **ABIR** , **YASMINE** , **SAMEH** et **SOUAD** qui n'ont pas cessée de me conseiller. Encourager et soutenir tout au long de mes études.

A mes neveux, **YASSER** , **SALIM**, **MARYAM**, **MARAM**, **LYDIA**, **HOUSSAM JAWAD**, qui m'ont donné du

Sans oublier mon binôme **ROMAISSA** pour son soutien moral sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

Au-delà des noms cités, il existe un cercle précieux de personnes qui ont joué un rôle significatif dans mon parcours. Je vous exprime i reconnaissante pour votre présence et votre soutien qui ont marque positivement ma vie.

BOUHAMIDI NERDJES



DÉDICACES

Il n'y a pas de mots pour exprimer l'amour et le respect que j'ai pour vous, et je ne peux que dédier mon mémoire de fin d'études pour :

Ma chère mère **KOUBIA DJAMILA,**

La source de tendresse et la source du don, celle qui m'a donné amour et affection, mon inspiration et la raison de ma vie continue.

Mon cher père **MANSOURI DJAMAL,**

Mon soutien et source de détermination, celui qui m'a fait confiance et m'a aimé gratuitement

Si une personne a une mère et un père, alors j'en ai deux, **MANSOURI MOHAMMAD** et **GAID AIDA**. Je remercie Dieu d'être devenu une source de fierté pour vous.

À mes sœurs : **MASSOUDA** et **CHAIMA**

À mes frères : **AISSA** et **YOUSEF**

À ma nièce : **NADA WAHAB**

Ils sont mon soutien après mes parents, même leur plus jeune est formidable par ses actions et sa gentillesse

À mes amis surtout mon binôme **NERDJES**, à ma famille et à tous ceux qui m'ont fait confiance et ont prié pour moi

À tous mes professeurs depuis mes premières années d'école.

À tous ceux qui avaient une grande estime pour lui

MANSOURI ROUMAÏSSA



Tableau des matières

Résumé	
ملخص	
Abstract	
Remerciements	
Dédicaces	
Tableau des Matières	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1

Chapitre I : Présentation de l'entreprise

I.1 Histoire et évolution de MFG.....	3
1.2 Les effectifs de MFG.....	3
1.3 Développement.....	3
1.4 Distribution.....	4
1.5 Objectifs de MFG.....	4
1.6 Organisation structurelle.....	4

Chapitre II : Généralités sur le verre

II.1. Introduction.....	7
II.2. Définition du verre.....	7
II.3. Composition du verre.....	7
II.3.1. Oxydes formateurs (les vitrifiant)	7
II.3.1.1. Silice : (dioxyde de silicium SiO_2)	7
II.3.1.2. Anhydride (Bore ou borax anhydre B_2O_3)	8
II.3.1.3. Anhydride phosphorique (Phosphore P_2O_5)	8
II.3.2. Oxydes modificateurs	8
II.3.2.1. Fondants	8

II.3.2.2. Oxyde de sodium (Soude Na_2O)	8
II.3.2.3. Oxyde de potassium (K_2O)	8
II.3.2.4. Oxyde de magnésium (MgO).....	8
II.3.2.5. Stabilisants.....	8
II.3.2.6. Oxyde de fer (Fe_2O_3)	8
II.3.2.7. Oxyde de plomb (PbO).....	8
II.3.3. Les colorants.....	9
II.4. Fabrication du verre.....	9
II.5. Les familles du verre	12
II.6. Propriétés du verre	12
II.6.1. Propriétés physiques	12
II.6.1.1. Transparence.....	12
II.6.1.2. Dureté	12
II.6.1.3. Densité.....	12
II.6.1.4. Résistance et l'élasticité.....	13
II.6.1.5. Imputrescibilité.....	13
II.6.1.6. Imperméabilité.....	13
II.6.2. Propriétés thermiques.....	13
II.6.2.1. La dilatation	13
II.6.2.2. La conductivité	13
II.6.3. Propriétés chimiques	13
II.6.3.1. L'action de l'eau	14
II.6.3.2. L'action de l'air.....	14
II.6.3.3. L'action de la lumière.....	14
II.6.3.4. L'action des acides.....	14
II.6.4. Propriétés optique	14
II.6.5. Propriétés mécaniques	14
II.6.6. Propriétés rhéologiques	14
II.6.6.1. La viscosité.....	14
II.6.6.2. La tension superficielle.....	15

II.7. Les Types de verre	16
II.7.1. Les verres plats	16
II.7.2. Les fibres de verre	16
II.7.3. Les verres creux	17
II.7.4. Le verre à couches	17
II.7.5. Les verres transformés	17
II.7.5.1. Le verre trempé	17
II.7.5.2. Le verre feuilleté	18

CHAPITRE III : Verres à Couches

III.1. Définition d'une couche mince	20
III.2. Définition d'un verre à couches.....	20
III.3. Structure d'un verre à couches	20
III.4. Le rôle des couches	21
III.4.1. Le coefficient de transparence, ou de transmission lumineuse (TL).....	21
III.4.2. Le facteur solaire (FS ou gg).....	21
III.4.3. Le coefficient de transfert thermique U	21
III.4.4. Le facteur gain solaire.....	21
III.5. Les fonctions d'un verre à couches.....	22
III.5.1. Les fonctions optiques.....	22
III.5.2. Les fonctions chimiques	22
III.5.3. Les fonctions électriques.....	22
III.5.4. Les fonctions multiples	22
III.6. Principe d'interaction de la radiation solaire avec un verre à couches	22
III.7. Classification des verres à couches dans le bâtiment.....	23
III.7.1. Classe A.....	23
III.7.2. Classe B.....	23
III.7.3. Classe C.....	23
III.7.4. Classe D.....	23
III.7.5. Classe S.....	23

III.8. Techniques de déposition des couches minces	23
III.8.1. Dépôt chimique	24
III.8.2. Dépôt physique.....	24
III .9. Comparaison entre les deux technique d'élaboration de la couche mince	24
III.10. Principales étapes du processus de fabrication Des Verres à Couches	25
III.10.1. Déchargeuse à deux côtés.....	25
III.10.2. Lavage et séchage du verre.....	25
III.10.3. Dépôt des couches sous vide.....	26
III.10.3.1. Pulvérisation cathodique magnétron.....	26
III.10.3.1.1. Effet magnétron	27
III.10.3.1.2. Principe.....	27
III.10.3.1.3. Propriétés des cathodes magnétrons	28

CHAPITRE IV : Matériels et Méthodes

IV.1. Introduction	30
IV.2. Matériaux utilisés.....	30
IV.3.1. Les méthodes Contrôlent de qualité	31
IV.3.1.1. Analyse spectrophotométrie Online	31
IV.3.1.1. Principe.....	31
IV.3.1.2. Avantages.....	31
IV.3.2. Analyses et tests laboratoires Out line	32
IV.3.2.1. Contrôle visuel	32
IV.3.2.2. Mesure Colorimétrie (Ultra Scan Pro).....	32
IV.3.2.2.1. Principe.....	32
IV.3.2.3. Analyse de la résistivité	33
IV.3.2.4. Test de résistance à l'abrasion	33
IV.3.2.4.1. Préparation des échantillons	33
IV.3.2.4.2. Mode opératoire du test	34
IV.3.2.5. Test de Corrosion (Chambre corrosion à condensation d'humidités)	34
IV.3.2.5.1. Méthodologie.....	34

IV.3.2.5.2. Démarrage du Test.....	35
IV.3.2.6. Test de vieillissement UV	35
IV.3.2.6.1. Préparation de l'échantillon	35
IV.3.2.6.2. Démarrage du test	36
IV.3.3. Durabilité chimique des verres à couches.....	36
IV.3.3.1. Durabilité chimique par rapport à NaCl (test brouillard salin).....	36
IV.3.3.1.1. Principe	37
IV.3.3.1.2. Méthode.....	37
A. Préparation de la solution saline.....	37
B. Démarrage du cycle de test	37
IV.3.3.2. Durabilité par rapport à Acide sulfuriques (test d'immersion).....	38
A. Dispositif	38
B. Démarche	39
IV.3.4. Microscopie optique.....	39

CHAPITRE V : Résultat et discussion

V.1. Corrosion de verre à couche.....	41
V.2. Résultat d'analyse d'échantillons avant et après trempe thermique.....	41
V.2.1. Mesures de la Résistivité	41
V.2.2. Mesure des indices de couleur (L*, a*, b*) Réflexion du coté couche (Rf).....	41
V.3. Résultats de test d'abrasion	42
V.4. Résultats de test de corrosion à condensation humidités	43
V.5. Résultats de durabilité chimique par rapport à NaCl (Test brouillard salin)	45
V.6. Résultats de durabilité chimique par rapport à Acide Sulfurique (Test d'immersion)	47
V.7. Résultat Test de vieillissement UV	48
V.8. Résultats de Microscope optique.....	49
Conclusion Générale	51
Bibliothèque	52

Liste des abréviations

MFG : Méditerranéen Float Glass

ASTM : Américain Society for Testing and Materials

ISO : International Organizations for Standardisations

PVB : PolyVinyl Butyral

TL : Coefficient de transparence, ou de transmission lumineuse

FS ou gg : Facteur Solaire

U : Coefficient de transfert thermique

g : Facteur gain solaire

CVD : Chemical Vapor Deposition

PVD : Physical Vapor Deposition

LPCVD : Low Pressure Chemical Vapor Deposition

LCVD : Laser Chemical Vapor Deposition

PECVD : Plasma-Enhanced Chemical Deposition

ND : Secret du métier

L* : Désigne la clarté

a* : Désigne la composante de couleur rouge/vert

b* : Désigne la composante de couleur jaune/bleu

UV : Ultraviolet

NSS : Neutral Salt Spray

Rf : Réflexion Film (coté couche)

ΔE : L'indice de changement de couleur

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma organisation de l'entreprise MFG.....	5
Figure II.1 : Schéma de processus de fabrication du verre flotté.....	9
Figure II.2 : Schéma montrant le four de fusion.....	10
Figure II. 3 : Organigramme montrant le transport de la matière première.....	10
Figure II.4 : Schéma montrant le bain d'étain.....	11
Figure II.5 :Schéma montrant le refroidissement.....	11
Figure II. 6 : Schéma représente la découpe de produit fini.....	11
Figure II.7 : Variations du la viscosité d'un verre en fonction de la température.....	15
Figure II.8 : Photo montrant les verres plats.....	16
Figure II.9: Photo montrant les fibres de verre.....	16
Figure II. 10 : Photo montrant les verres creux sous forme de bouteilles.....	17
Figure II.11 : Photo montrant Verre trempé brisé.....	18
Figure III.1 : Photo montrant les verres à couches.....	20
Figure III.2: Schéma montrant l'interaction de la radiation solaire avec un verre à couches...	22
Figure III.3 : Photo montrant le dispositif de la machine à laver et du séchoir.....	26
Figure III.4 : Photo montrant la zone de la partie de pulvérisation cathodique.....	26
Figure III.6: Principe de la pulvérisation cathodique à magnétron.....	28
Figure III.7 : Schéma montrant le Processus de verre à couches.....	28
Figure IV.1 : Photo montrant le four de la trempe thermique.....	31
Figure IV. 2 : Photo montrant l'appareil de test à l'abrasion.....	33
Figure IV.3 : Photo montrant la chambre de corrosion humide.....	35
Figure IV.4: Photo montrant l'appareil de test de vieillissement UV.....	36
Figure IV.5 : Photographie de l'appareillage du test brouillard salin.....	38
Figure IV.6 : Photographie du microscope optique utilisé.....	39
FigureV.1 : Photo montrant les échantillons de verre à couche non trempé avant et après le test de corrosion humide.....	43
FigureV.2 : Photo montrant les échantillons de verre à couche trempé avant et après le test de corrosion humide.....	44
Figure V.3 : Graphes représente-représentant les Indices de changement de couleur d'échantillon trempé et non trempé après test de corrosion en fonction de temps.....	44

FigureV.4: Photo montrant les échantillons de verre à couche non trempé avant et après test de brouillard salin.....	46
FigureV.5 : Photo montrant les échantillons de verre à couche trempé avant et après test de brouillard salin.....	46
FigureV.6: Graphe représente représentant les Indices de changement de couleur d'échantillon trempé et non trempé après test de brouillard salin en fonction de temps.....	47

Liste des Tableaux

TableauII.1 : Les familles du verre et leurs utilisations.....	12
Tableau III. 1 : Comparaison entre les deux techniques d'élaboration de la couche mince.....	24
Tableau IV.1 :Identification du matériau utilisé.....	30
Tableau V .1 : Mesures de la résistivité ava après la trempe thermique.....	41
Tableau V. 2 : Réflexion du coté couche (Rf) avant et après trempe thermique.....	41
Tableau V. 3 : Résultat de In résistivité avant et après test.....	42
Tableau V .4 : Résultats de la résistivité de test corrosion humide.....	42
Tableau V.5 : Résultat de Réflexion de côté couche.....	43
Tableau V .6 : Résultats de la résistivité.....	45
Tableau V.7 : Résultat de Réflexion film.....	45
Tableau V .8 : Résultats de transmission.....	48
Tableau V. 9 : Mesure de test vieillissement UV.....	49

Introduction générale

Introduction Générale

Durant les quelques cinq millénaires que compte l'histoire du verre, le développement des procédés de fabrication est resté tributaire des perspectives offertes par l'empirisme. L'apparition des techniques analytiques performantes et adaptées a permis, dans la seconde moitié du vingtième siècle, un contrôle plus rigoureux de la production, ce qui a conduit à l'élaboration des matériaux de haute technologie par le procédé float glass >>.

Ce mémoire est le fruit d'un travail pratique (stage) effectué au niveau de l'entreprise Méditerranéen Float Glass (MFG), qui se situe à l'Arbaa dans la wilaya de Blida. Cette filiale du groupe Cevital Algérie est spécialisée dans la fabrication du verre plat et est actuellement un leader dans ce domaine au niveau national où 70% de sa production est destinée à l'exportation, et au niveau international en vue d'exploiter la plus grande ligne de production de verre en Afrique et l'unique producteur de verre plat au niveau maghrébin.

Ce travail a pour objectif de la comparaison des propriétés de résistance à la corrosion de verre à couche (type) avant et après traitement thermique (la trempe). En outre, les principaux propriétés physiques et chimiques requis dans le verre à couche medi solaire dark bronze 14.

Il s'agit de suivre les propriétés de résistance à la corrosion de verre à couche avant trempe et après trempe. Pour cela, on s'est intéressé à l'étude comparative de deux échantillons de verre, (verre à couche medi Solar dark Bronze 14 non trempé) et un échantillon de verre (verre à couche médi solaire dark bronze 14 trempé).

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

Après une introduction générale, le premier chapitre expose des généralités sur le verre sa définition, son histoire, sa structure et les principales propriétés de verre on générale. Les types de verres, Les procédés d'élaboration de verre plat, Après, dans le deuxième chapitres on aura la définition d'un verre à couche les propriétés ... , matériels, les méthodes d'analyse et de caractérisation utilisées dans ce travail seront présentés dans le troisième chapitre.

Dans le quatrième chapitre, les différents résultats et leur discussion.

En fin, nous terminerons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I :

Présentation de l'entreprise

I.1 Histoire et évolution de MFG

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

MFG, est une filiale de CEVITAL qui est le premier groupe industriel privé en Algérie, MFG est créé en Avril 2007, en vue d'exploiter la plus grande ligne de production de verre en Afrique et l'unique producteur de verre plat au niveau maghrébin. L'entreprise possède une capacité de 600 Tonnes par jour, ce qui est largement supérieur aux besoins. Nationaux qui sont de l'ordre 180 tonnes/Jour. C'est donc environ 420 tonnes (soit 70%) de la capacité installée qui sont destinés à l'exportation.

Le complexe est implanté au niveau du site de l'Arbaa dans la wilaya de Blida et a nécessité un investissement de 100 Millions d'Euros. Il fait partie d'un grand projet constitué de 3 lignes de production de verre plat d'une capacité totale de 642 400 Tonnes par an et de 5 usines de transformation de verre.

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

Avec cet investissement. Cevital est le plus grand producteur de verre plat en Afrique. Classé devant l'Afrique du sud avec une production de 500 Tonnes par jour et l'Egypte avec une production de 400 Tonnes par jour.

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

1.2 Les effectifs de MFG

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

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

1.3 Développement

MFG a mis en place trois autres lignes de production du 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 vetendres

Pour couvrir le marché algérien, notamment, en double vitrage isolant destiné aux fenêtres et aux façades des bâtiments.

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.

1.4 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.

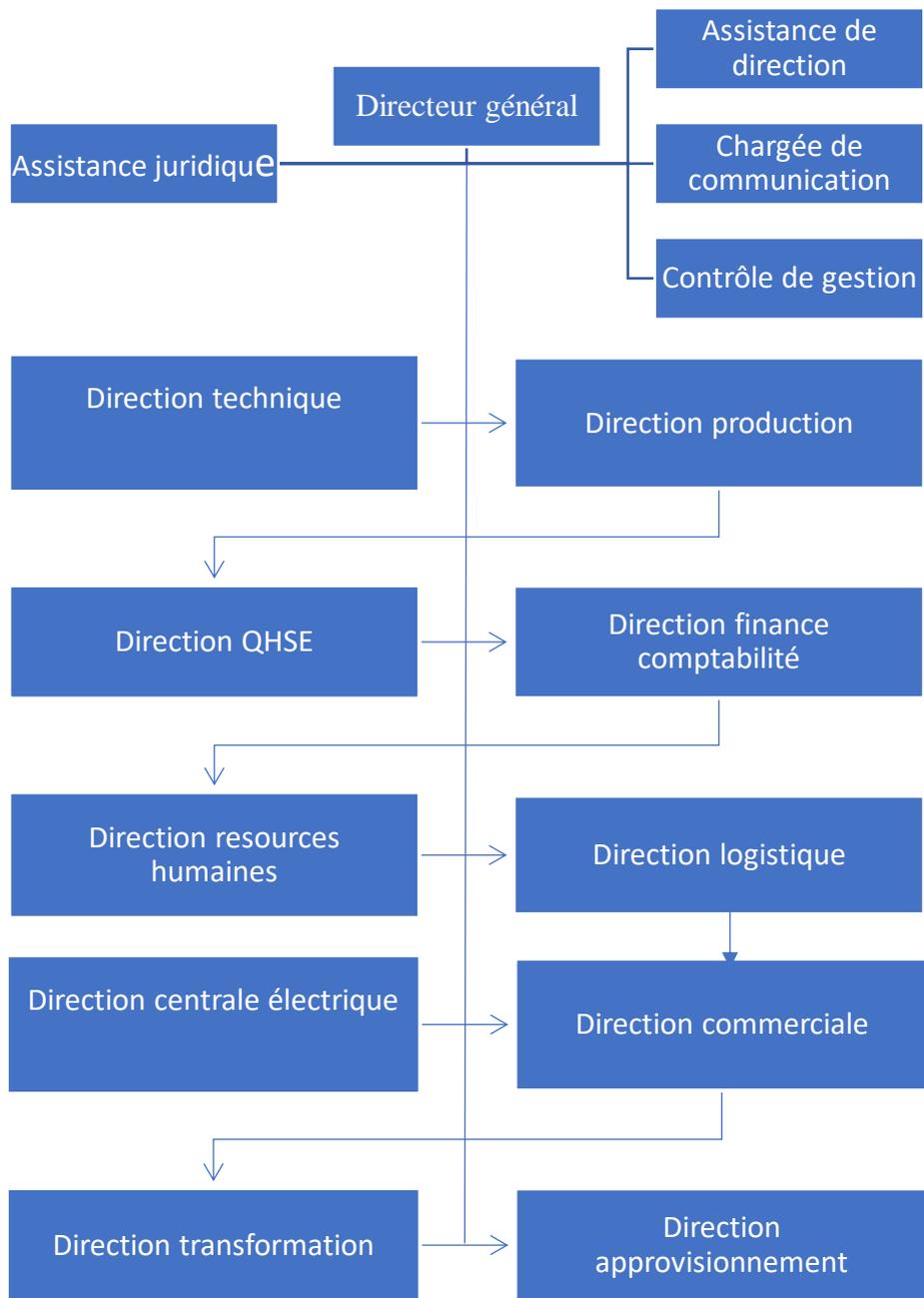
1.5 Objectifs de MFG

MFG est née avec la volonté de relever le défi d'ériger l'industrie du verre au stade d' incontournable dans son domaine. Dès ses débuts, cette entreprise s'est fixé des objectifs à atteindre, parmi ses objectifs nous pouvons citer ce qui suit :

- Satisfaction des clients :
 - Optimiser sa part du marché international
 - Satisfaire les demandes du marché national;
 - Respecter l'environnement et l'hygiène et sécurité de ses employés;
 - Aboutir les certificats suivants :
- ISO (international standardisation organisation)
 - QHSE (qualité, hygiène, sécurité environnement)
 - Un développement qualitatif et quantitatif de la production. Pour cela, la société MFG envisage de réaliser une deuxième ligne d'une capacité de 800tonnes/jours.
 - La réalisation de ce projet constitue l'une des étapes pour faire de MFG un opérateur incontournable dans le monde du verre plat.

1.6 Organisation structurelle

La figure 1.1 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.



FigureI.1 : Organisation de l'entreprise MFG

Chapitre II :

Généralité sur le verre

II.1. Introduction

Le verre a été présent sur Terre pendant des centaines de milliers d'années, avec des traces remontant à environ 100 000 av. J-C, lorsque les humains préhistoriques utilisaient l'obsidienne, un verre naturel dérivé des éruptions volcaniques, pour créer des outils et des pointes de flèches.

Ils exploitaient également les tectites, des billes de verre formées par l'impact de météorites, comme des ornements, et les fulgurites, des formations creuses et opaques résultant de la foudre frappant le sable [1].

Environ 5000 ans av. J-C, dans l'ancienne Mésopotamie, les premiers verres silico-sodo-calciques similaires au verre industriel moderne étaient fabriqués en faisant fondre du sable avec des algues marines ou des minéraux comme le natron.

Initialement utilisé pour les bijoux et les perles, le verre a évolué au fil du temps, avec les premiers produits verriers humains découverts en Égypte vers 3000 av. J-C, caractérisés par leur opacité et leurs teintes vertes ou bleues [2].

II.2. Définition du verre

Pour la plupart des scientifiques, le terme "verre" est universellement défini comme tout solide non cristallin qui démontre le phénomène de transition vitreuse, indépendamment de sa méthode de production. [3] Ce phénomène correspond à l'état vitreux. [4].

Selon la norme ASTM C-162-92 de l'American Society for Testing and Materials, le verre est un produit inorganique fondu qui passe de l'état liquide à l'état solide sans cristallisation. Le scientifique Gustav Tammann a précisé cette définition en décrivant le verre comme l'état figé d'un liquide en surfusion qui se solidifie sans cristalliser [5].

Ainsi, le verre est un matériau dur mais fragile et cassant, transparent au rayonnement visible de la lumière.

II.3. Composition du verre

Certains éléments comme le silicium et le bore peuvent former un verre par leur seule combinaison avec de l'oxygène et par élévation à une très haute température. Ces oxydes sont appelés oxydes formateurs car ils forment le squelette du verre. On les combine avec d'autres éléments dits <<< modificateurs >> qui sont :

- Les fondants qui abaissent la température de fusion des oxydes formateurs (silice = 1730°C) [6].
- Les stabilisants qui modifient les propriétés physiques du verre atténuées par l'adjonction du fondant.

II.3.1. Oxydes formateurs (les vitrifiant)

II.3.1.1. Silice : (dioxyde de silicium SiO_2) : C'est le composant principal du verre qui représente environ 70% de la masse. Elle est l'élément formateur de réseau. Si l'on augmente sa quantité, on augmente la dureté du verre. Son point de fusion est à 1730°C [6]. Elle entre dans la fabrication sous forme de sable dont les plus purs en contiennent 99,5% (les sables quartzeux).

Le sable de Fontainebleau, du fait de sa qualité, est très recherché pour la fabrication de verres d'optique et de cristal. Plus le pourcentage de silice est élevé et plus le coefficient de dilatation est faible ; et le verre est résistant.

II.3.1.2. Anhydride borique : (Bore ou borax anhydre B_2O_3) : Il diminue le coefficient de dilatation et améliore la résistance aux chocs thermiques ; il est aussi plus résistant à l'eau. Son point de fusion est à 2300°C . Il sert pour le travail de laboratoire (verre thermorésistant comme le Pyrex). Il possède aussi les propriétés d'un fondant.

II.3.1.3. Anhydride phosphorique : (Phosphore P_2O_5) : Il est employé dans le domaine de l'optique. La principale source au Moyen Âge est les cendres de bois.

II.3.2. Oxydes modificateurs

II.3.2.1. Fondants : (oxydes alcalins) : La silice permet d'obtenir un verre, mais son point de fusion est très élevé (1730°C). En ajoutant des fondants, on abaisse cette température à 1400°C [6] (économie d'énergie) et on facilite les possibilités de travail.

Les fondants sodiques et potassiques ont été utilisés conjointement dès le moyen âge.

II.3.2.2. Oxyde de sodium (Soude Na_2O) : Il entrait autrefois dans la composition sous forme de cendres de plantes marines (ex : la salicorne) ou de nitre (grec = nitrons).

Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et sa résistance aux agents atmosphériques ainsi que le coefficient de dilatation. Il est plus utilisé pour le verre industriel que pour le verre soufflé car il doit être constamment réchauffé lors du façonnage.

II.3.2.3. Oxyde de potassium (K_2O) : Il entrait autrefois dans la composition sous forme de cendres de plantes terrestres comme la fougère. Aujourd'hui, on utilise du salpêtre (nitrate de potassium KNO_3). Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et le rend doux à la taille, mais il diminue sa résistance chimique. Il avantage le soufflage du verre car il augmente le temps de travail lors du façonnage.

II.3.2.4. Oxyde de magnésium (MgO) : Il est utilisé sous forme de dolomite (calcium + magnésium).

Il n'est pas indispensable pour tous les verres, sauf le verre flotté, le verre à vitre et en gobeletterie. Il abaisse la température de fusion et augmente la résistance aux agents chimiques.

II.3.2.5. Stabilisants : (oxydes alcalino-terreux) : L'introduction d'un oxyde alcalin (fondant) a provoqué la rupture d'une liaison Si – O et l'apparition d'un oxygène « non pontant ». Ceci a pour effet de fragiliser le réseau et d'augmenter la solubilité à l'eau.

II.3.2.6. Oxyde de fer (Fe_2O_3 : (c'est un stabilisant et un colorant) : On le retrouve souvent dans les roches naturelles ayant une couleur verdâtre. Il faut donc procéder à une décoloration de cette teinte. Pour cela, on peut ajouter du bioxyde de manganèse (MnO_2) (savon des verriers).

II.3.2.7. Oxyde de plomb (PbO) : Il entre dans la composition du cristal. Il abaisse également le point de fusion en stabilisant la composition. Il rend le verre plus éclatant tout en lui conférant une légère teinte jaunâtre, il est plus agréable à couper et à travailler.

II.3.3. Les colorants : Les verres sont le plus souvent teintés dans la masse. Cela signifie que l'on ajoute des oxydes métalliques pendant la fusion. Ils entrent en très faible proportion du mélange (ex : oxyde de cuivre pour du vert).

La coloration dans la masse est due à la présence dans le verre d'ions de métaux de transition [6].

II.4. Fabrication du verre

Chaque type de verre (creux, plat et technique) a un mode d'élaboration différent. Cependant, on relève cinq grandes étapes dans le cycle de fabrication du verre qu'il nous faut passer en revue pour mieux comprendre ensuite comment sont recyclés les déchets de verre.

L'élaboration des produits en verre, à partir des matières de base, passe par les étapes indiquées dans la figure ci-joint :

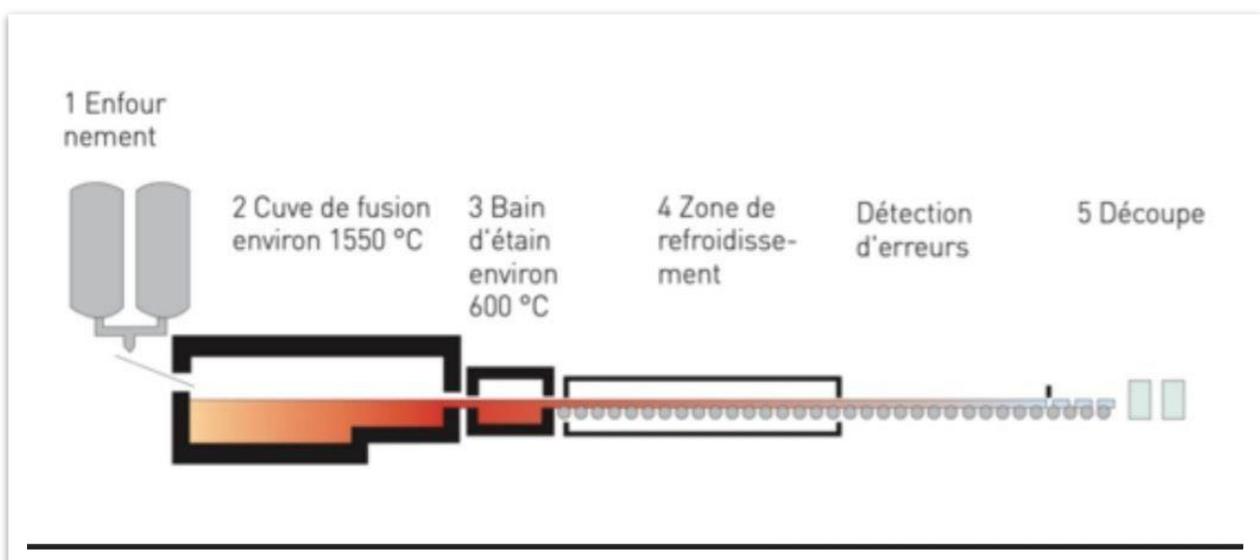


Figure I1.1 : Schéma de processus de fabrication du verre flotté

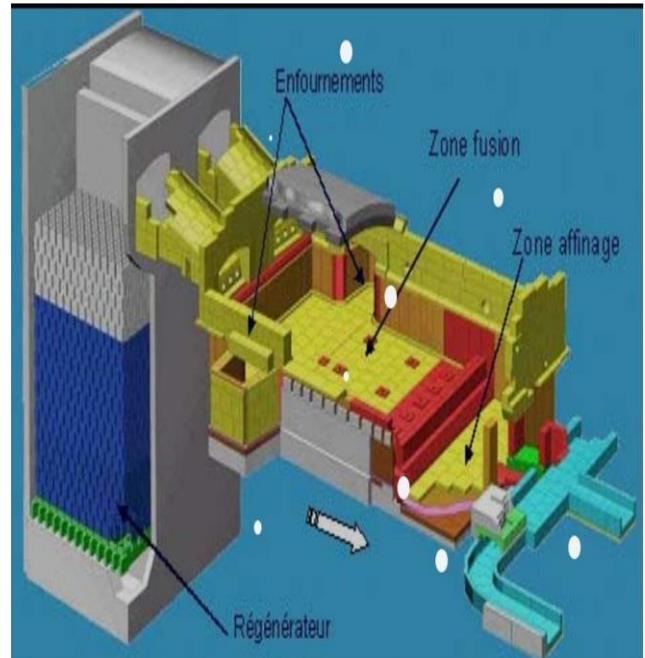
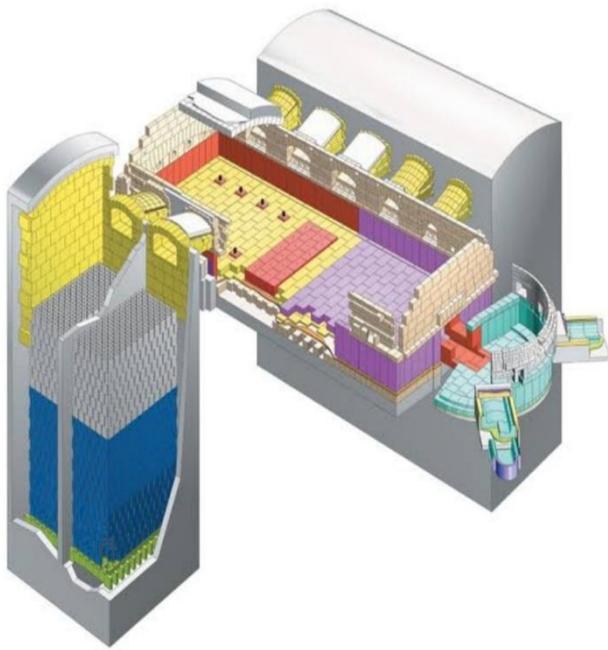


Figure I1.2 : Schéma montrant le four de fusion

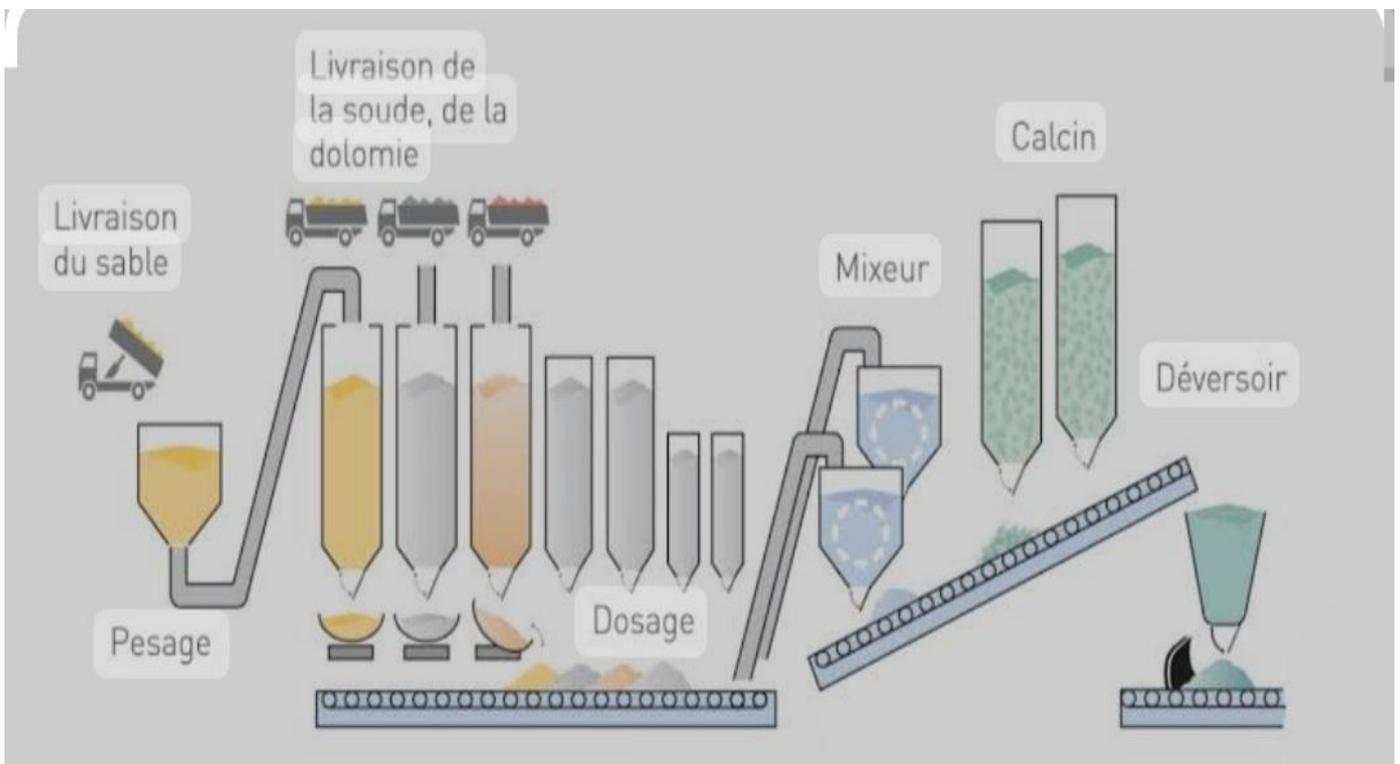


Figure I1.3 : Organigramme montrant le transport de la matière première

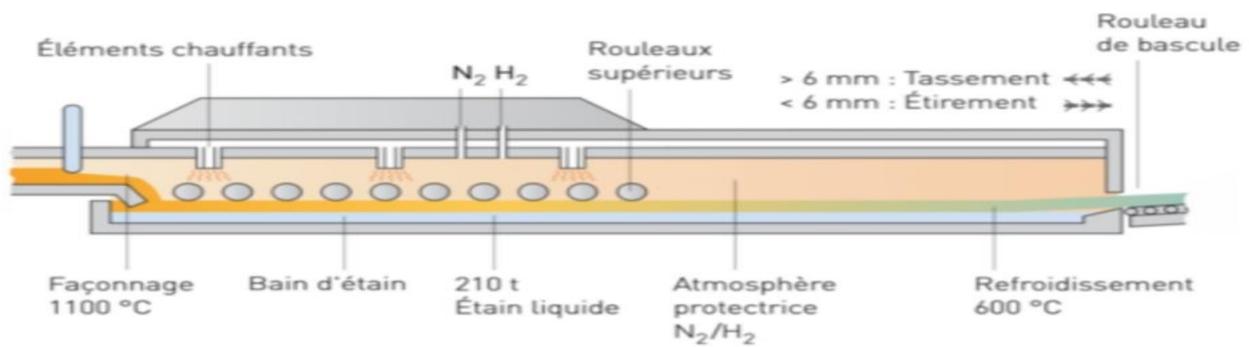


Figure I1.4 : Schéma montrant le bain d'étain

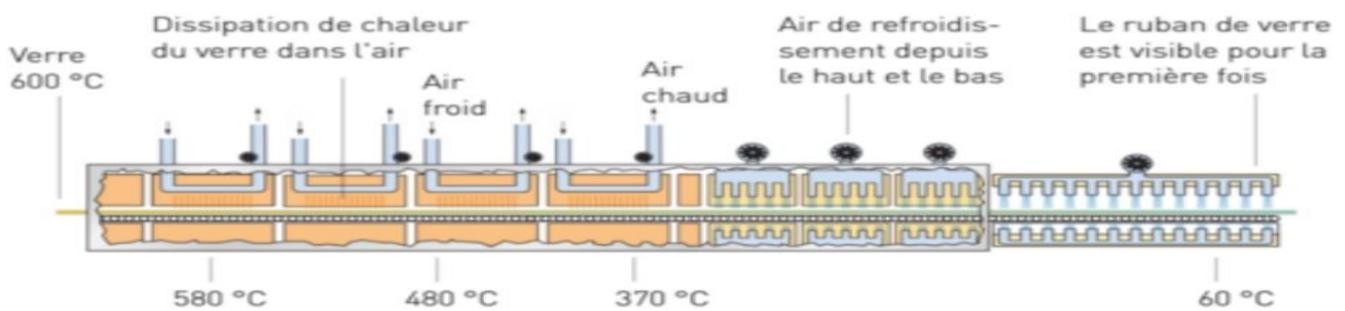


Figure I1.5 : Schéma montrant le refroidissement

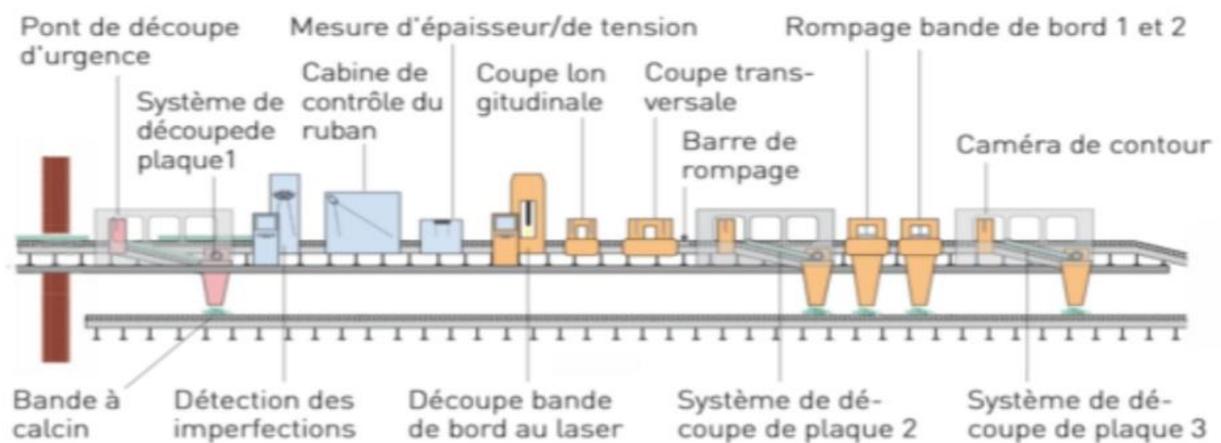


Figure I1.6 : Schéma représente la découpe de produit fini

II.5. Les familles du verre :

Ils existent plusieurs familles de verre selon leurs composition chimiques sont représentées dans le Tableauci-dessus :

Tableau II.1 : Les familles du verre et leurs utilisations

Famille du verre	Composition	Utilisation
Verres sodo-calciques	SiO ₂ , CaO , Na ₂ O	Vitrage, bouteilles, flacon et verre à boire
Verres au plomb	SiO ₂ , PbO , K ₂ O	Ecrans de protection en radioscopie ; Hublots d'observation pour l'industrie nucléaire
Verres borosilicatés	SiO ₂ , B ₂ O ₃ , Na ₂ O	Pharmacie, Laboratoire et Culinaire
Verres Aluminosilicaés	SiO ₂ ,Al ₂ O ₃ ,CaO,B ₂ O ₃	Bouteilles ; tubes ; tiges ; plaques et verres de laboratoire
Verres de silice	SiO ₂	Fibre optique
Vitrocéramiques	Li ₂ O, Al ₂ O ₃ , SiO ₂	Culinaire Optiques
Bio-verres	Na ₂ O,CaO,SiO ₂ ,P ₂ O ₅	Médicales
Verres fluorés	ZrF ₄ combiné à d'autres fluorures	Fibre optique ; composants massifs dans le domaine médical
Verres de chalcogénures	S, Se, Te, mélange à Ge, Si , Sb , As et/ou halogènes	Éléments d'optique de Caméras infrarouges ; modulateurs Et déflecteurs de faisceaux infrarouges
Verres métalliques	Métal de transition + non-métal ou deux métaux de rayons atomiques différents	Renforcement béton ; Industrie électrique
Zircones	SiO ₂ , ZnO ₂ ,Na ₂ O	Renforcement du ciment

II.6. Propriétés des verres :

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

II.6.1. Propriétés physiques

II.6.1.1. Transparence : Le verre ne peut être opaque ou opalescent.

II.6.1.2. Dureté : Seuls les diamants et le carbure de tungstène le rayent. Le verre le plus dur est le verre de Bohème et le cristal est le plus tendre.

II.6.1.3. Densité : Elle dépend des composants ; elle est d'environ 2,5. Cela signifie qu'un mètre cube pèse environ deux tonnes et demie ou qu'une feuille d'un mètre carré et d'un millimètre d'épaisseur pèse 2,5 kg.

$$V_m = 0.38 \frac{\sqrt{E}}{\rho}$$

Avec :

E : module de Young

ρ : la masse volumique

II.6.1.4. Résistance et l'élasticité : Il cassure du verre est liée à sa flexion et à sa résistance au choc. Il casse là où le métal se tord. Contrairement, sa résistance à la compression est importante : il faut une pression de 10 tonnes pour briser un centimètre cube de verre.

II.6.1.5. Imputrescibilité : Non putréfiable.

II.6.1.6. Imperméabilité : elle est extrêmement grande mais le verre reste poreux pour certains liquides comme le kérosène

II.6.2. Propriétés thermiques

II.6.2.1. La dilatation : c'est un très mauvais conducteur de chaleur. Il se brise s'il subit un brusque changement de température car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas en même temps. Son coefficient de dilatation est faible, ce qui lui confère de nombreuses applications : il sert d'isolant thermique (laine de verre).

On retrouve presque les mêmes coefficients que certains métaux d'où l'exécution de soudures verre-métal. Ce coefficient varie selon la composition.

On définit cette loi pour calculer la dilatation

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L \cdot \Delta T} \quad 1/C^\circ$$

II.6.2.2. La conductivité :

Il est mauvais conducteur (environ 500 fois moins que le cuivre) ; on l'utilise comme isolant électrique. C'est aussi un bon isolant acoustique suivant l'épaisseur de la feuille. Ceci n'est pas le cas à chaud car il devient conducteur à partir de 250 °C.

- Il est ininflammable et incombustible.
- Et pour définir cette conductivité :

$$\lambda = \frac{Q \cdot \varepsilon}{F \cdot (t_2 - t_1) \cdot \tau} \quad \text{Kcal/ m.h.}^\circ\text{C}$$

Q : représente la quantité de chaleur transmise; kcal. KJ

ε : l'épaisseur de la couche de la matière; m

F : la surface traversée par la courant de chaleur; m²

(t_2-t_1): la différence des températures des deux côtés de la couche de la matière (°C)

τ : le temps de passage du courant de chaleur (heures).

II.6.3. Propriétés chimiques

II.6.3.1. L'action de l'eau : L'eau agit sur les silicates qui, en se décomposant, forment un dépôt en surface qui devient peu à peu opaque ; le verre perd de sa transparence.

II.6.3.2. L'action de l'air : Les silicates alcalins se combinent avec l'acide carbonique contenue dans l'air ce que donne un dépôt blanchâtre à la surface du verre.

II.6.3.3. L'action de la lumière : Exposés aux ultraviolets, certains verres se colorent où se décolorent.

II.6.3.4. L'action des acides : Les acides décomposent la silice. Le plus rapide est l'acide fluorhydrique qui permet de graver en profondeur le verre plaqué. Le verre donc être dissout. [6]

II.6.4. Propriétés optiques

La propriété optique la plus connue est l'indice de réfraction ainsi que toutes les notions de transmission et réflexion qui en découlent. Si l'on y ajoute l'absorption, la diffusion et la dispersion de la lumière, on a une description assez complète de l'interaction entre le verre et la lumière [9].

II.6.5. Propriété mécanique

Le verre est un matériau fragile, qui, après rupture, présente un faciès conchoïdal. On trouve de nombreux paramètres permettant de décrire les qualités et les défauts du verre dans toutes les situations de mise sous contrainte [9] :

- Le module élastique ou module d'Young E, qui caractérise la déformation du verre avant la rupture,
- La contrainte à la rupture (s)
- La ténacité (K1c) ou facteur critique d'intensité de contrainte

II.6.6. Propriétés rhéologiques

Cette section traite de la rhéologie, qui est la science étudiant la déformation et l'écoulement des solides et liquides sous l'effet de forces extérieures. Le verre a un comportement

rhéologique complexe dû à sa structure. À très hautes températures, il a les propriétés d'un liquide visqueux, tandis qu'en dessous de la température de transition vitreuse T_g , il se comporte comme un solide élastique.

II.6.6.1. La viscosité : Elle est une propriété clé du verre qui conditionne son mode de fabrication. Le verre est un liquide surfondu sans point de fusion défini. Sa viscosité diminue progressivement avec l'augmentation de la température, d'abord lentement puis plus rapidement.

À la température de fusion, la viscosité atteint environ 10^{12} poises car les liaisons sont semi-rompues mais les fragments structuraux limitent encore la mobilité.

Inversement, lors du refroidissement, les liaisons se reforment progressivement, augmentant la viscosité. La viscosité dépend de la nature et de la structure du verre. Son contrôle est primordial pour la fabrication industrielle du verre [10].

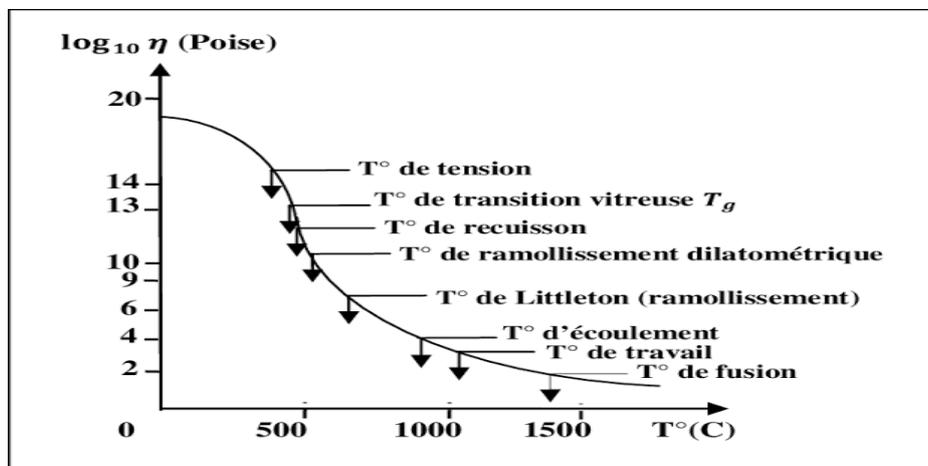


Figure 11.7 : Variations de la viscosité d'un verre en fonction de la température

Cette graphie caractérisée par l'équation suivante :

$$\eta = A \cdot e^{\frac{E_n}{RT}}$$

Avec :

$A = N \cdot h / V$, Cette formule est valable pour le domaine $[T_g - T_f]$.

A : Constante qui dépend de la composition chimique du matériau ;

N : Nombre d'Avogadro ;

h : Constante de Plank ;

V : Volume molaire du corps ;

E_n : Energie libre d'activation d'écoulement du verre en [kJ / mol] ;

R : constante universelle des gaz, $R = 8.32$ [J / mol.K]

T : Température en [K] ;

II.6.6.2. La tension superficielle : La tension superficielle joue un rôle important lors de la fusion et la fabrication du verre. Elle est définie comme la force résultante dirigée vers l'intérieur d'un liquide qui s'exerce sur les molécules situées à la surface.

Pour amener une particule de l'intérieur vers la surface, un travail est nécessaire. Les corps avec une grande surface ont donc une énergie plus élevée et ont tendance à minimiser leur surface pour diminuer leur énergie, d'où la forme sphérique des liquides.

L'énergie nécessaire pour former une nouvelle surface d'un m^2 est appelée énergie libre superficielle, exprimée en J/m^2 . La notion de tension superficielle, mesurée en N/m , est plus couramment utilisée.

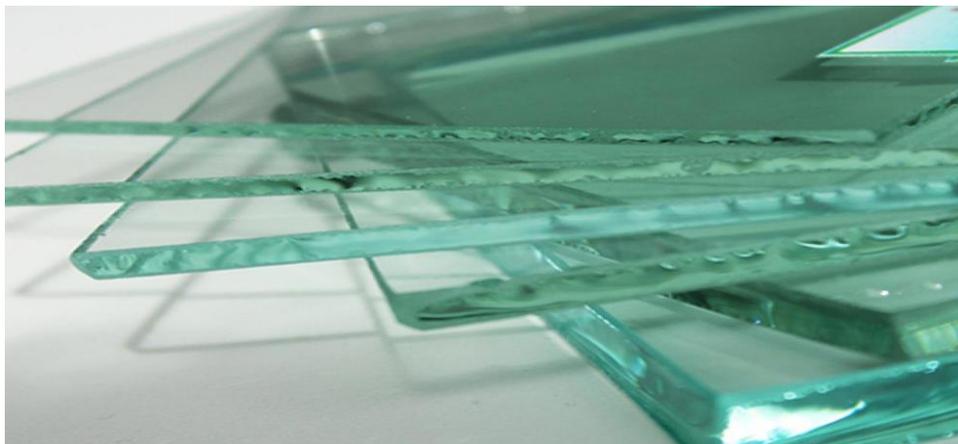
La diminution de l'énergie superficielle peut se faire physiquement par changement de forme ou chimiquement par rassemblement des particules liées par des forces moindres [10].

II.7. Les Types de verre : Il existe différents types de verre selon leur composition chimique et leur méthode de fabrication. Voici quelques-uns des principaux types de verre :

II.7.1. Verre plat :

Le verre plat est fabriqué sous forme de feuilles et est principalement utilisé pour la fabrication des vitres et des miroirs.

Il constitue une bonne part de la production industrielle verrière au XXI^e siècle. Les procédés de fabrication incluent le soufflage, le coulage sur table et le laminage [11].



FigureI1.8 : Photo montrant les verres plats

II.7.2. Fibres de verre

La fibre de verre est un filament de verre utilisé pour renforcer les matériaux composites. Elle est présente sous différentes formes, comme les mats, les fils simples ou mélangés à des

plastiques. Elle est utilisée dans les bâtiments, les transports, l'électricité, les sports et loisirs, ainsi que les équipements industriels [12].

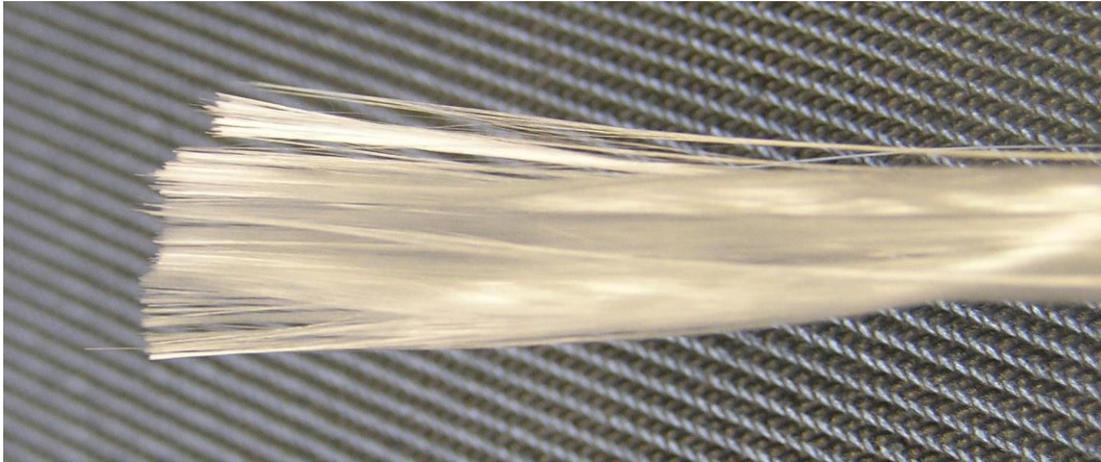


Figure II.9 : Photo montrant les fibres de verre

II.7.3. Verres creux :

Un verre creux désigne tout produit verrier ayant une forme non plane. Il est utilisé pour la fabrication d'emballages de liquides, denrées alimentaires, parfums et verrerie de table, tels que bouteilles, flacons, pots, bocaux et verres à boire. Il constitue le plus gros tonnage de verre fabriqué. [8]



Figure II.10 : Photo montrant les verres creux sous forme de bouteilles

II.7.4. Verre à couches :

Le verre à couche est traité avec des oxydes métalliques pour lui conférer de nouvelles propriétés. Il peut être utilisé pour l'isolation thermique et le contrôle du rayonnement solaire. Différentes couches peuvent être appliquées, comme des traitements anti-reflets ou des couches réfléchissantes.

II.7.5. Verre transformé :

Le verre transformé peut faire référence à diverses techniques de modification du verre, telles que l'utilisation d'aérogels de cellulose pour améliorer l'isolation thermique et réduire l'impact écologique. Il peut également inclure des verres intelligents, anti-incendie et d'autres applications spécifiques. Parmi le verre transformé on a :

II.7.5.1. Verre trempé : Le verre trempé est chauffé puis refroidi rapidement pour augmenter sa résistance mécanique. Il se brise en petits morceaux non tranchants en cas de rupture, ce qui le rend plus sûr. Il est utilisé dans les fenêtres, les portes et les applications où la sécurité est essentielle [13].



Figure II.11 : Verre trempé brisé

II.7.5.2. Verre feuilleté : Le verre feuilleté est constitué de deux ou plusieurs couches de verre collées ensemble avec un intercalaire en plastique (comme le PVB).

Il offre une sécurité accrue, car même s'il se brise, les morceaux restent collés à l'intercalaire. Il est utilisé dans les parebrises de voitures, les vitrines et les applications où la résistance aux chocs est importante [13].

CHAPITRE III :

Verre à couche

III.1. Définition d'une couche mince

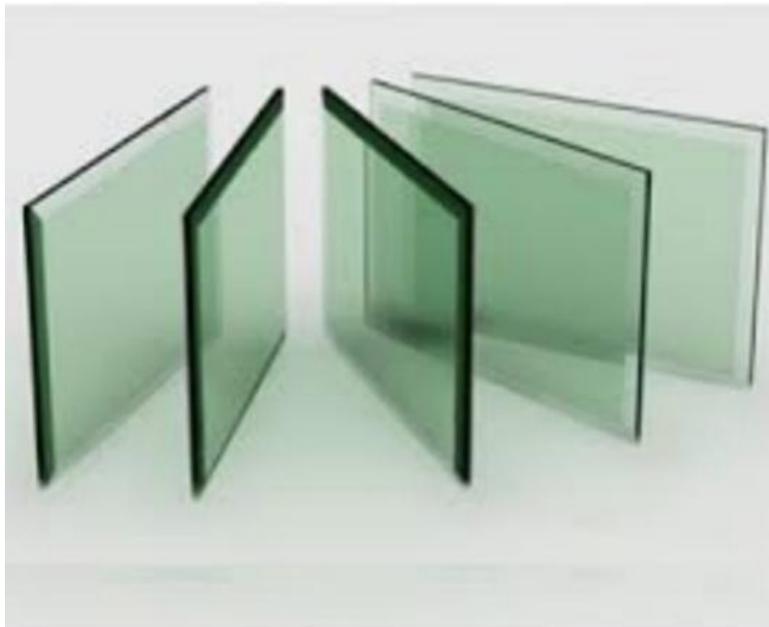
Une couche mince est un revêtement dont l'épaisseur peut varier de quelques couches atomiques à une dizaine de micromètres.

Par principe, une couche mince d'un matériau donné est un élément de ce matériau dont l'une des dimensions appelée l'épaisseur, est fortement réduite, de telle sorte qu'elle varie de quelques nanomètres «< nm » [14].

III.2. Définition des Verres à Couches

Par définition, les verres à couches sont des produits verriers de types industriels (très généralement des produits élaborés à partir de verre float) qui sont revêtus d'une couche mince et composée d'oxydes . L'épaisseur de cette couche est de l'ordre de 10 nanomètres (soit un centième de micromètre) à 800 nanomètres (0,8 μm).

Pour Optimiser les performances, la couche peut être constituée d'un empilement de plusieurs sous-couches [15].



FigureIII.1 : Photo montrant les verres à couches.

III.3. Structure d'un verre à couches

Dans la composition d'un verre à couches et pour assurer ses propriétés et sa durabilité, le dépôt est généralement structuré comme suit :

- Une sous-couche d'accroche permettant une bonne adhérence sur le verre.
- Une ou plusieurs couches fonctionnelles conférant au verre les caractéristiques recherchées.

- Éventuellement, une couche de protection chimique et mécanique, notamment dans le cas des verres à faible émissivité.

III.4. Rôle des couches

Les couches déposées sur les vitrages ont plusieurs rôles. En effet, elles agissent sur la transmission lumineuse, le contrôle solaire, le transfert thermique et l'émissivité.

III.4.1. Coefficient de transparence, ou de transmission lumineuse (TL)

Ce coefficient de transparence caractérise la proportion de lumière visible (spectre de longueurs d'onde comprises entre 0,38 μm et 0,78 μm) traversant le vitrage.

Évidemment, le coefficient TL est compris entre 0 (opacité complète) et 1 (transparence totale).

III.4.2. Facteur solaire (FS ou gg)

Le facteur solaire est la fraction de l'intensité du rayonnement solaire (visible et non visible) traversant directement le vitrage ainsi que la fraction absorbée par le vitrage puis réémis vers l'intérieur sous forme chaleur (Infrarouge).

III.4.3. Coefficient de transfert thermique U

Le coefficient U est la mesure de déperdition (ou de gain) de chaleur à travers un vitrage provoquée par une différence de température d'air entre l'extérieur et l'intérieur. La valeur du coefficient U est le résultat non seulement de la nature des couches déposées sur les feuilles de verre, mais aussi de la structure du vitrage.

Le coefficient U s'exprime en $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ (watts par m^2 et par degré). Le coefficient U d'un vitrage simple est de l'ordre de 6 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, mais peut descendre à 1,1 pour un triple vitrage à isolation renforcée.

Des valeurs encore plus faibles sont obtenues si ces triples vitrages ont des espaces remplis non pas d'air mais de gaz moins conducteurs de la chaleur comme l'argon ou encore mieux le vitrage

Les coefficients TL, U, g et e ne peuvent pas toujours être choisis séparément. Un compromis est souvent à trouver. Par exemple, dans un pays froid, il vaut mieux avoir un contrôle solaire g élevé pour profiter du chauffage par le rayonnement solaire pendant la journée.

En outre, il existe des combinaisons plus ou moins complexe comme des vitrages autonettoyants, à isolation thermique renforcée (à faible émissivité) et à contrôle solaire [16].

III.4.4. Facteur gain solaire

Le gain d'énergie solaire représenté par la valeur « g » est principalement intéressant pour les composants transparents. La valeur « g » est aussi appelée TSET (Total Solar Energy Transmittance), SHGC (Solar Heat Gain Coefficient) ou simplement facteur solaire.

Il exprime le rapport entre l'énergie solaire totale irradiée sur un élément et la partie de cette énergie qui est transmise à travers l'élément à l'intérieur du bâtiment.

Lorsque le rayonnement solaire intercepte un élément, une partie de l'énergie incidente est directement réfléchiée vers l'extérieur, une partie est transmise et une partie est absorbée par l'élément lui-même [17].

III.5. Fonction d'un verre à couches

Les différentes couches déposées sur le verre peuvent remplir diverses fonctions [18]. :

III.5.1. Fonctions optiques : Les couches modifient le comportement optique du verre, que ce soit dans le spectre visible ou infrarouge.

III.5.2. Fonctions chimiques : Elles confèrent principalement des propriétés hydrophobes ou hydrophiles à la surface vitrée.

III.5.3. Fonctions électriques : L'objectif est d'obtenir un dépôt transparent à la lumière visible mais conducteur électrique. Cela permet notamment d'éliminer les charges électrostatiques et de réaliser des vitrages électrochromes "intelligents".

III.5.4. Fonctions multiples : Souvent, une combinaison de ces différentes propriétés est recherchée, à l'image des double-vitrages autonettoyants et à isolation thermique renforcée

III.6. Principe d'interaction de la radiation solaire avec un verre à couches

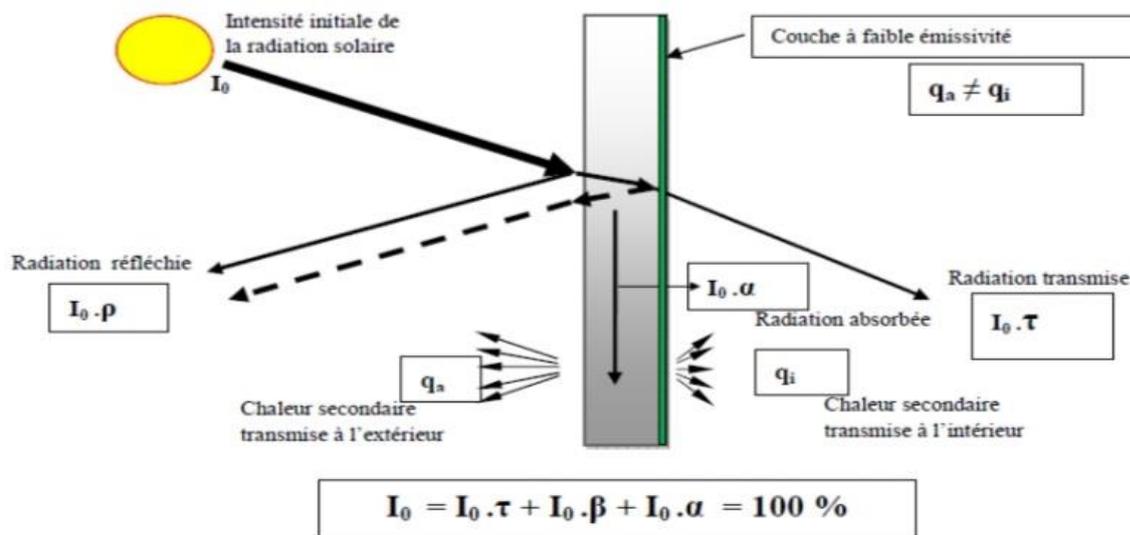


Figure III.2 : Schéma montrant l'interaction de la radiation solaire avec un verre à couches

α : absorbance

ρ : réflectivité

τ : coefficient de transmission

Tel que : $a + \rho + \tau = I$

On constate que la radiation solaire initiale (I_0) se dissipe en différentes formes sur les différents milieux de la vitre. Une partie de la radiation se réfléchit (I_n), une autre est transmise à l'intérieur (I_o) et une troisième est absorbée par le verre (10_a). La radiation solaire absorbée se dissipe également sous forme de chaleur vers l'intérieur (q_a) et l'extérieur (q_i) de la vitre.

Effectivement, le dépôt de couches métallique ou oxyde métallique sur la surface du verre peut diminuer le transfert de chaleur entre extérieur et l'intérieur d'une vitre.

III.7. Classification des verres à couche dans les bâtiments

La classification des verres à couches dépend de la méthode de dépôt utilisée, qui influe sur la durabilité et la résistance mécanique des couches.

Un dépôt pyrolytique (CVD - Chemical Vapor Deposition) offre une plus grande durabilité et peut être placé sur la face externe. En revanche, un dépôt par évaporation sous vide ou pulvérisation cathodique (PVD - Physical Vapor Deposition), moins résistant aux agressions malgré de meilleures performances, doit être placé sur la face interne d'un double vitrage.

Une manipulation soigneuse est également requise. Ainsi, selon la nature des dépôts, les vitrages pour bâtiments sont classés en différentes catégories [19]:

III.7.1. Classe A : La surface revêtue peut être placée en face interne ou externe.

III.7.2. Classe B : Pour un vitrage simple, la surface revêtue doit être placée à l'intérieur (face 2).

III.7.3. Classe C : Pour un vitrage double (ou multiple) scellé, la surface revêtue doit être située à l'intérieur de la cavité (faces 2 ou 3 pour un double vitrage).

III.7.4. Classe D : Le verre revêtu doit être incorporé dans des ensembles scellés, avec la surface revêtue à l'intérieur de la cavité (faces 2 ou 3), immédiatement après l'élaboration de la couche. Pas d'utilisation en simple vitrage.

III.7.5. Classe S : La surface revêtue peut être positionnée en face interne ou externe, mais ces verres sont uniquement utilisés pour des applications spécifiques

III.8. Techniques de déposition des couches minces

Le dépôt de couche mince désigne l'ensemble des techniques qui permettent de déposer une couche mince ou film mince de matériau sur un substrat ou sur des couches déposées antérieurement.

Le terme < mince > est relatif, mais la plupart des techniques de dépôts permettent typiquement de déposer des épaisseurs de couche de quelques nanomètres.

Certains, comme l'épitanie par jet moléculaire, permettent même de déposer une seule couche atomique à la fois.

III.8.1. Dépôt chimique

Lors d'un dépôt chimique, un fluide précurseur subit une réaction chimique sur une surface solide, laissant une couche solide. Puisque le fluide recouvre l'ensemble de la surface du solide, le dépôt s'effectue sur toute la surface.

On peut citer comme exemples le revêtement, le procédé sol-gel, l'enduction centrifuge (souvent appelée spin-coating, emprunté de l'anglais), le dépôt chimique en phase vapeur (ainsi que la variante assistée par plasma), ou encore le dépôt de couche atomique.

III.8.2. Dépôt physique

Un dépôt physique implique des procédés mécaniques, électromécaniques ou thermodynamiques pour produire une couche mince de solide. Le matériau à déposer sur le substrat est placé dans un environnement tel que les particules qui le composent échappent de sa surface.

En face de cette source de matériau se situe une surface plus froide (substrat), qui récupère de l'énergie de ces particules lorsqu'elles arrivent, ce qui permet la formation d'une couche solide.

L'ensemble de ce système est maintenu dans une chambre de dépôt sous vide, pour plusieurs raisons. Premièrement, cela rend le mouvement des particules plus rapide, et deuxièmement, cela limite la présence intempestive dans la couche déposée d'atomes ou molécules présentes dans l'atmosphère environnante.

On peut citer comme exemples l'évaporation sous vide, la pulvérisation cathodique, le dépôt laser pulser, le dépôt électro hydrodynamique [20].

III.9. Comparaison entre les deux technique d'élaboration de la couche mince

Tableau III.1 : Comparaison entre les deux techniques d'élaboration de la couche mince

Technique	Types	Avantages	Inconvénients
CVD (Chemical Vapeur Deposition)	<ul style="list-style-type: none"> • LPCVD • LCVD • PECVD 	<ul style="list-style-type: none"> • Vitesse de dépôt élevée • Amélioration de la qualité des couches, • Possibilité de formation de composés 	<ul style="list-style-type: none"> • Dépôt en vue directe delà source : effets d'ombrage. • Dépôts de qualité aléatoire (structure colonnaire...) • Dépôt en 'vue directe'.

<p>PVD (Dépôt physique en phase vapeur)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pulvérisation cathodique (diode, triode) • Magnétron 	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilité de déposer de nombreux métaux, alliages, Composés réfractaires, Conducteurs ou diélectriques • Maîtrise de la Stœchiométrie • Bonne adhérence des Dépôts • Bon pouvoir de Recouvrement • Faible température de dépôt • Vitesse de dépôt : qq mm/h • Mise en œuvre aisée, • Possibilité de Travailler en réactif • Dépôt sur surfaces Complexes (3D) 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible vitesse de dépôt • Investissement élevé Cibles sensibles à la fissuration • Réaction possible de la cible avec l'atmosphère gazeuse • Investissement élevé • Dépôts non uniformes
---	---	---	---

III.10. Principales étapes du processus de fabrication des Verres à Couches

III.10.1. Déchargeuse à deux côtés :

Elle permet de dépiler les feuilles de verre clair réceptionnées de la ligne Float.

Le premier dépilleur transversal saisit la vitre des chevalets ou des chariots installés des deux côtés pour dépiler automatiquement sur le convoyeur à rouleaux.

C'est au niveau des deux premiers convoyeurs d'angle que sont rajoutées sur la ligne les vitres à dimensions fixe (petit format), à l'aide du dispositif de levage manuel.

Les vitres défectueuses peuvent être retirées de la ligne par un convoyeur à rouleaux libres.

Les vitres sont transportées vers la machine à laver. Juste avant le dispositif de revêtement (Coucheuse) de plaque supports spécifique vient insérer des vitres de petit format sur la ligne de transport.

III.10.2. Lavage et séchage du verre

Le lavage du verre est effectué afin d'éliminer toute trace de contamination, à l'aide d'eau déminéralisée et d'un séchage correct.

Si l'épaisseur de la vitre diffère du réglage de la machine à laver, la machine tourne à vide en premier avant d'adapter à l'épaisseur correcte, puis la plaque de verre entre dans la machine à lavée

Après le lavage, les plaques de verre passent dans la chambre de séchage où il faut les sécher soigneusement.

Une enceinte fermé est installée juste à la sortie de la machine à laver qui se tend jusqu'à l'entrée de la coucheuse afin de protéger et maintenir les verres dans un état propre et sec.



FigureIII.3 : Photo montrant le dispositif de la machine à laver et du séchoir.

III.10.3. Dépôt de couches sous vide

III.10.3.1. Pulvérisation cathodique magnétron

Afin d'augmenter la densité ionique au voisinage de la cible, celle-ci est équipée d'un dispositif magnétron, qui est constitué de deux aimants permanents concentriques de polarité inverse situés sous la cible.



FigureIII.4 : Photo montrant la zone de la partie de pulvérisation cathodique

Comme le montre la photographie de la **FigureIII.5** la ligne est interdite pour les gens qui ont des maladies cardiaques.



FigureIII.5

III.10.3.1.1. Effet magnétron

Une décharge diode DC est entretenue par les électrons secondaires éjectés de la cathode sous l'effet du bombardement ionique ; dans ce cas les électrons qui ne rencontrent pas de molécules de gaz s'éloignent de la cathode et sont captés par l'anode.

Si on superpose au champ électrique un champ magnétique B , qui lui est perpendiculaire, les trajectoires électroniques [19-20], s'enroulent autour des lignes de champ magnétique, augmentant considérablement les chances d'ioniser une molécule de gaz au voisinage de la cathode.

III.10.3.1.2. Principe

La décharge lumineuse est concentrée dans la zone où le champ magnétique est le plus intense. Il se forme donc une zone lumineuse de même forme que la zone couverte par les

aimants. La cathode magnétron existe sous deux formes principales Planes (rectangulaires ou rondes) et cylindriques.

III.10.3.1.3. Propriétés des cathodes magnétrons

La force de Lorentz induite provoque un mouvement hélicoïdal des électrons augmentant ainsi leurs trajectoires, et de ce fait, leur efficacité d'ionisation.

L'effet magnétron permet donc d'entretenir la décharge pour de plus faible pression de travail, améliorant par conséquent la qualité des revêtements [21].

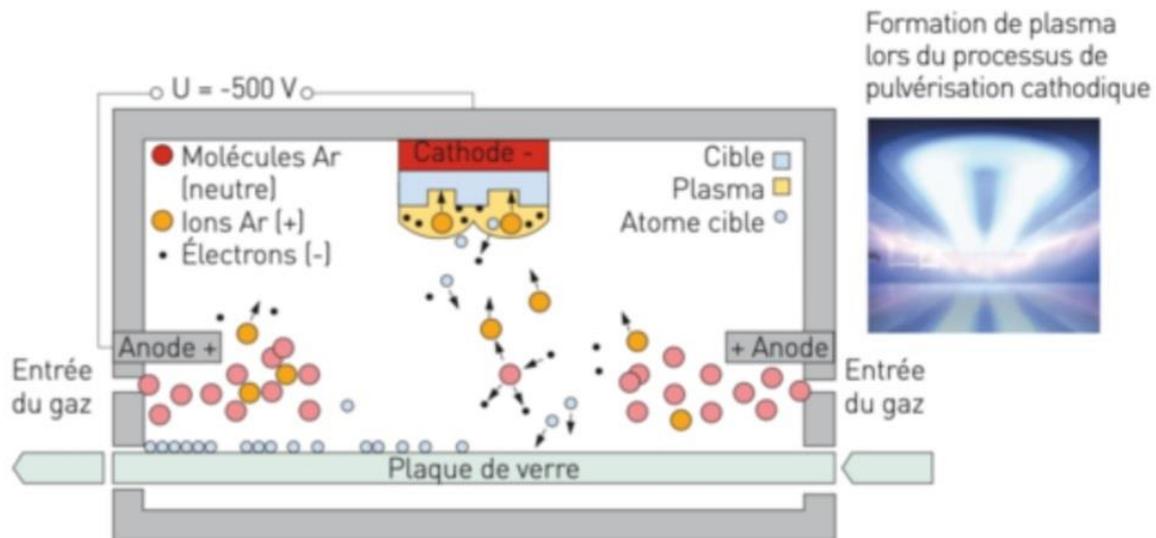


Figure III.6 : Principe de la pulvérisation cathodique à magnétron.

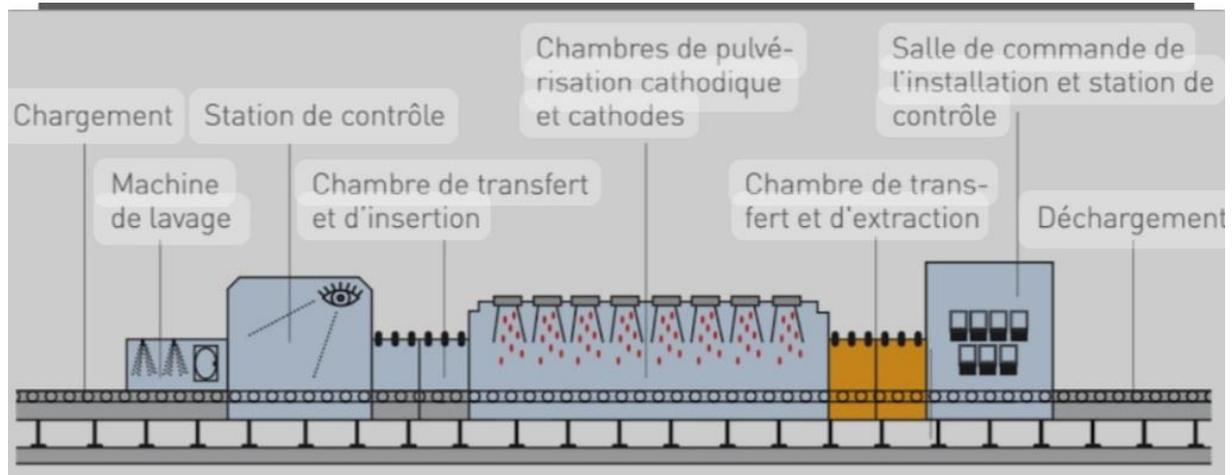


Figure III.7 : Schéma montrant le Processus de verre à couches

CHAPITRE IV

Matériel et Méthode

IV.1. Introduction

Notre travail expérimental se compose essentiellement consiste à faire des analyses pour des échantillons de verre à couche types MIDI Solier Dark Bronze trempé et sans tremper et comparer les résultats obtenus pour développer le verre la plus résistante à la corrosion.

IV.2. Matériaux utilisés

Dans cette étude, on prend des échantillons de verre à couche d'identification dans le tableau III.1 dessus :

TableauIV.1 : Identification du matériau utilisé

Fournisseur	Nomination Commercial	Composition			Fonctionnalité
		Substrat	Couches	Technique du dépôt	
MFG	Medi Solar Dark Bronze	Verre float plat clair	ND	PVD / Pulvérisation cathodique sous vide à magnéto	Réfléchissant / Contrôle solaire

Et pour la trempe thermique :

Ce traitement a pour objet d'augmenter la résistance et la rigidité du verre à couche aux chocs, et matériels utilisés :

- Des échantillons de verre à couches (dimensions 100x100 mm)
- Four à moufle (température 650°C pendant 30min).
- Un chronomètre.



Figure IV.1 : Photo montrant le four de la trempe thermique

IV.3. Les méthodes contrôlent de qualité

IV.3.1. Analyse spectrophotométrie Online

La spectrophotométrie online est une technique analytique utilisée pour mesurer l'absorption, la réflexion ou la transmission de la lumière par un échantillon, sans avoir à ne le prélever ni à l'analyser en laboratoire. Elle permet un suivi en continu des propriétés optiques d'un milieu liquide ou gazeux directement dans le procédé industriel.

IV.3.1.1. Principe : Le principe consiste à utiliser les accessoires suivants :

- Une source lumineuse émet un faisceau traversant le milieu à analyser.
- Un détecteur mesure l'intensité de la lumière **transmise ou réfléchi**e à différentes longueurs d'ondes.
- Un spectrophotomètre calcule l'absorption en comparant.

Les spectres obtenus renseignent sur la composition et la concentration des espèces présentes.

IV.3.1.2. Avantages

Les avantages de la spectrophotométrie en ligne sont :

- Analyse en temps réel sans prélèvement ni préparation d'échantillons.
- Suivi continu des procédés industriels.
- Possibilité d'automatiser le contrôle et le pilotage.

IV.3.2. Analyses et tests laboratoires (Out ligne)

IV.3.2.1. Contrôle visuel

Le contrôle visuel est une technique d'inspection non destructive utilisée pour examiner visuellement les surfaces extérieures d'un objet, d'un matériau ou d'une structure afin d'y détecter des défauts, des dommages ou des anomalies.

C'est généralement la première étape d'un processus d'inspection plus approfondi. Cela peut inclure la recherche de :

- Fissures, criques, déformations
- Corrosion, piqûres, érosion
- Rayures, entailles, impacts
- Décolorations, taches
- Porosités, inclusions
- Défauts d'alignement, de montage
- Fuites, pertes d'étanchéité
- Etc.

IV.3.2.2. Mesure Colorimétrie (Ultra Scan PRO) La mesure colorimétrique avec l'appareil Ultra Scan PRO de HunterLab est une technique d'analyse optique permettant de caractériser les propriétés de couleur et de trouble de matériaux transparents ou translucides du composant : verres+ couches.

IV.3.2.2.1. Principe

Le principe consiste à utiliser les accessoires suivants :

- Une source lumineuse éclaire l'échantillon (flash)
- Des détecteurs mesurent la lumière transmise ou réfléchie à différents angles
- Les données colorimétriques (valeurs $L^*a^*b^*$, indice de jaune, etc.) sont calculées selon l'espace colorimétrique choisi (CIELab, XYZ...)
- Cela permet de quantifier la couleur, la transparence, l'opacité de l'échantillon

L'UltraScan PRO réalise ces mesures en sphère d'intégration, offrant une analyse précise et reproductible. On peut ainsi contrôler les variations de teinte, de limpidité, de transparence par exemple dues au processus de fabrication du verre à couches minces.

C'est un outil essentiel pour le contrôle qualité optique et l'étude des défauts d'uniformité et reproduction de couleur et aspect ces matériaux.

IV.3.2.3. Mesure de la résistivité superficielle

La mesure de la résistivité d'un verre à couche (ou verre revêtu) consiste à mesurer la résistance électrique de la couche mince déposée sur le verre.

Les principaux paramètres analysés sont :

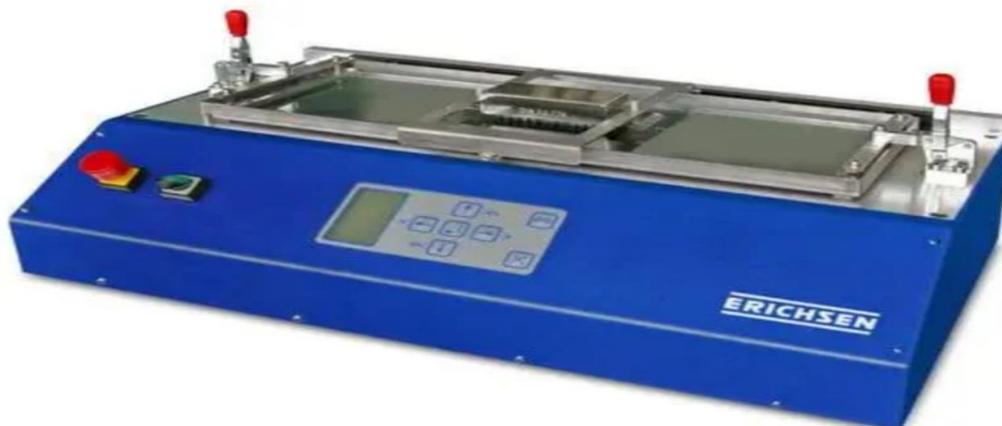
- La résistivité électrique intrinsèque du matériau de la couche
- L'uniformité de la résistivité en profil sur toute la surface
- La résistance de contact /d'interface entre la couche et le verre
- L'influence de la température sur la conduction électrique

Ces analyses permettent de contrôler la qualité et les performances électriques des couches minces conductrices ou résistives (semi-conductive), utilisées par exemple pour les vitrages isolant, électrochromes .

IV.3.2.4. Test de résistance à l'abrasion (à brosse Erichsen)

Le test de résistance à l'abrasion est réalisé par l'appareil présenté dans la Figure 3.2 ci-dessous. Il permet de tester la dureté des revêtements nettement des couches de protection couche de verre.

L'effet d'abrasion est obtenu par les mouvements de va et vient d'une brosse nylon normalisée sous certaines conditions et le nombre de cycles d'abrasion qui dépend du niveau de dureté du revêtement.



FigureIV.2 : Photos montrant l'appareil de test à l'abrasion

IV.3.2.4.1. Préparation des échantillons

Il passer par les étapes suivantes :

- Garder un échantillon témoin pour comparaison.

- Nettoyer soigneusement les échantillons en utilisant l'air Comprimé.
- Mettre sous tension la résistivité.
- Déposer l'échantillon en maintenant la couche conductrice vers le bas en contact avec la tête de mesure et bien centré.
- Mesure de la résistivité avant test.

IV.3.2.4.2. Mode opératoire du test

Il est nécessaire de nettoyer les échantillons, la brosse et la cuvette en acier avant et après chaque test afin d'éliminer les débris du verre.

- Allumer l'appareil et régler le nombre de course à 300 courses.
- Déposer l'échantillon de manière que la brosse endommage le couloir du centre de l'échantillon (côté couche).
- Après les 300 courses effectuées, enlever l'échantillon.
- Refaire l'essai pour le même échantillon de 200 courses.
- Mesure de la résistivité après 200 courses.

IV.3.2.5. Test de Corrosion (Chambres Corrosion à condensation d'humidités)

Le test de corrosion d'un verre à couche en chambre humide consiste à exposer l'échantillon de verre revêtu à des conditions sévères de température et d'humidité élevées dans une enceinte climatique contrôlée.

IV.3.2.5.1. Méthodologie

- Le test est effectué sur l'échantillon de corrosion de dimension 100*100 mm² découpé selon le plan d'échantillonnage.
- Au préalable, il faut effectuer les opérations suivantes :
- Nettoyer soigneusement l'échantillon avec l'air comprimé.
 - Mesurer la résistance superficielle.
 - Vérifier que l'équipement est bien alimenté.
 - Remplir le récipient avec 5 litres d'eau déminéralisée de conductivité < 5µs (pH = 5,5 à 6).
 - Mettre les échantillons sur le support a un angle d'exposition, et fermer le couvercle.
 - Allumer l'appareil et régler le thermostat à une température de T= (50 ± 1.5) °C.

-Programmer la durée du test à 336 heures.

IV.3.2.5.2. Démarrage du Test

-Régler l'heure du début du test.

-A la fin du cycle retirer les échantillons, les nettoyer avec de l'eau déminéralisée et les sécher avec de l'air comprimé teste est effectué sur l'échantillon de corrosion.

-Vérifier que l'équipement est bien alimenté.

-Effectuer un contrôle visuel sur l'échantillon testé.

-Après le refroidissement des échantillons déterminer la résistance superficielle

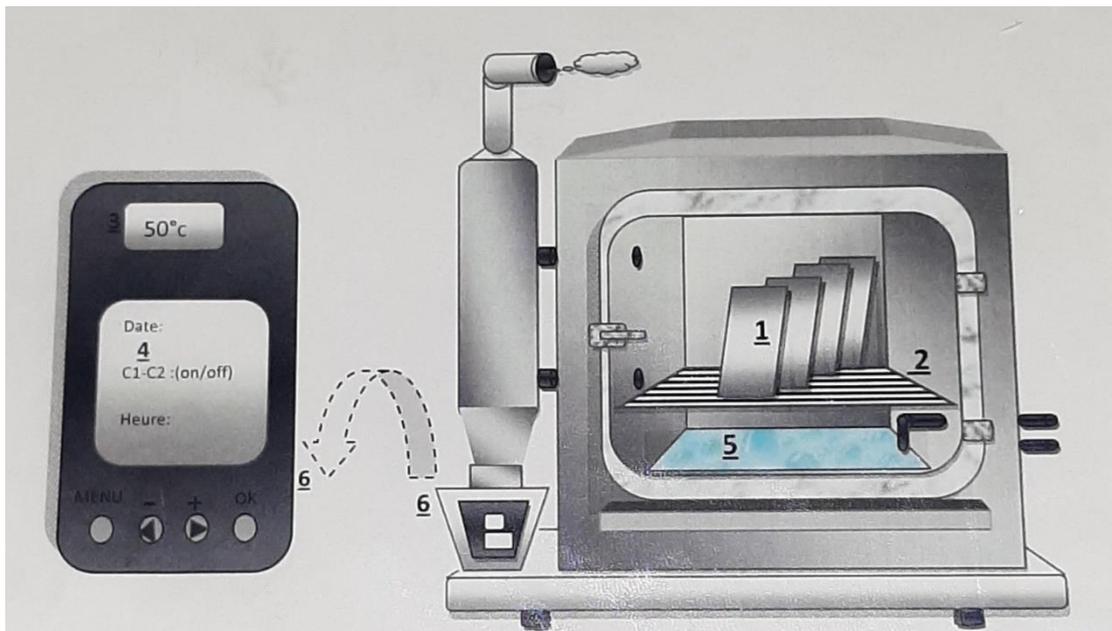


Figure IV.3 : Photos montrant Chambre de corrosion à condensation d'humidités

IV.3.2.6. Test de vieillissement UV

Consiste à exposer le verre revêtu à un rayonnement ultraviolet intense de manière accélérée, afin d'évaluer la tenue des couches minces face au vieillissement causé par les UV.

Le test est effectué sur un échantillon de dimension 100*100 mm² découpé selon le plan d'échantillonnage.

IV.3.2.6.1. Préparation de l'échantillon :

-Nettoyer l'échantillon analysé ainsi que l'échantillon de référence en utilisant l'air comprimé.

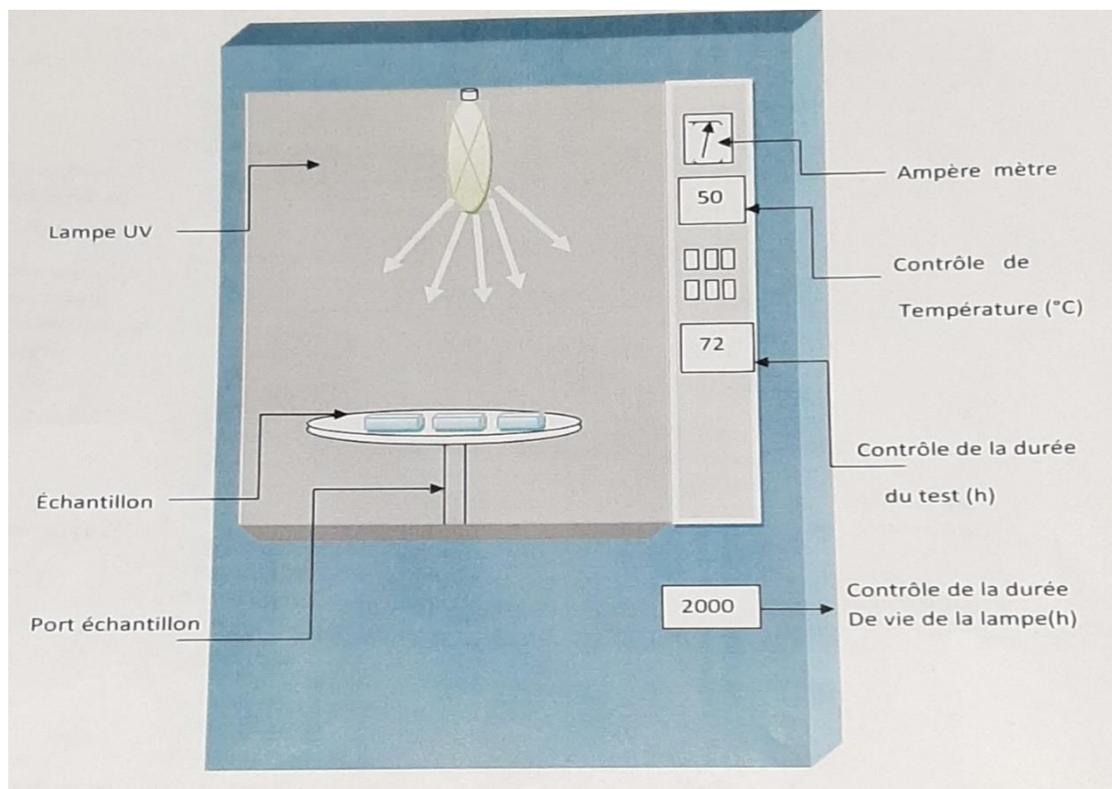
-Vérifier que l'échantillon ne présente aucun défaut.

-Mesure de la résistance superficielle et des indices optiques avant test

IV.3.2.6.2. Démarrage du test

Il consiste à :

- Déposer l'échantillon au milieu de l'appareil et que la couche conductrice se trouve en position inférieure.
- Contrôler les heures de service de la lampe UV.
- Déposer l'échantillon sur le support prévu ensuite fermer l'appareil correctement.
- Allumer le dispositif de chauffage et la lampe UV en appuyant sur tous les boutons en position 1.
- Régler la température à 50 °C.
- Noter les heures de début et de fin du cycle (durée du test 72 heures).



FigureIV.4 : Photos montrant l'appareil de test de vieillissement UV

IV.3.3. Durabilité chimique des verres à couches

IV.3.3.1. Durabilité chimique par rapport à NaCl (Test brouillard salin neutre) :

C'est un essai au brouillard salin neutre avec l'utilisation d'une solution de chlorure de sodium (NaCl) au pH neutre : test NSS (Neutral Salt Spray), est une évaluation standardisée de la

résistance à la corrosion de matériaux, que ce soit avec ou sans revêtement, temporaire ou permanent, de protection contre la corrosion.

La conduite de ces essais est décrite par différentes normes (ASTM B117 [1], DIN 50021 [2], EN ISO 9227 [3]). Dans tous les cas, les pièces à évaluer sont disposées dans une chambre d'essai dans laquelle une solution salée est vaporisée à une certaine température.

L'essai peut être réalisé de façon continue de six à plus de mille heures. Les matériaux les plus résistants à la corrosion peuvent être soumis à des essais plus longs.

L'essai au brouillard salin donnera des résultats différents d'une corrosion dans des conditions normales. La corrosion est en effet un phénomène complexe.

Cependant, l'essai au brouillard salin est une méthode de contrôle qualité des revêtements largement répandue dans l'industrie.

IV.3.3.1.1. Principe

Dans la chambre d'essai, la vaporisation d'une solution salée produit une atmosphère propice à la corrosion qui attaque la pièce testée.

Dans ces conditions, le phénomène de corrosion est accéléré et les revêtements perdent leurs propriétés de protection.

La durée du test dépendra de la qualité du revêtement. En fixant les paramètres de concentration de la solution salée, de température, de pression et de pH, les résultats sont reproductibles.

IV.3.3.1.2. Méthode

A. Préparation de la solution saline

Dans ce volet, il faut veiller à ce que la conductivité de l'eau, évaluée à l'aide d'un conductimètre, soit conforme aux exigences de la norme (inférieure à de $5 \mu\text{S} / \text{cm}$ à $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$)

La concentration de la solution saline est mesurée et surveillée et est conforme aux exigences de la norme à l'aide d'un réfractomètre de salinité étalonné.

Le pH de la solution saline est mesuré et surveillé et est conforme aux exigences de la norme à l'aide d'un pH-mètre étalonné.

B. Démarrage du cycle de test

Dans cette opération de cycle de test, il faut :

- Placer les échantillons dans la chambre conformément à la norme d'essai.
- Régler la température du saturateur d'air de la chambre conformément au tableau dans la norme de test.
- Assurer qu'aucun échantillon ne cache les autres échantillons et que les gouttelettes d'un échantillon ne peuvent pas tomber sur d'autres échantillons.

- Insérer des récipients de collecte de brouillard salin propres et vides autour des échantillons à l'intérieur de la chambre, de préférence à la hauteur de l'échantillon, et jamais en dessous des échantillons ou de tout autre objet qui pourrait y couler par le haut.
 - Vérifier que la température de la chambre est dans les limites acceptables.
- Vérifier que la pression d'air de l'atomiseur est dans les limites acceptables.
- Enregistrer le pH de la solution saline du réservoir 6,3.
 - Enregistrer la conductivité de l'eau déminéralisée lorsqu'elle est utilisée.
 - Surveiller le niveau de solution saline dans le réservoir et assurez-vous qu'il y en a assez pour les prochaines 24/48 heures.



FigureIV.5 : Photographie de l'appareillage du test brouillard salin Neutre

IV.3.3.2. Durabilité par rapport à Acide Sulfuriques (Test d'immersion)

Les tests d'immersion permettent d'évaluer plus rapidement la durabilité et les performances des couches et d'apporter des ajustages rapides si nécessaire, en comparaison avec les méthodes conventionnelles.

A. Dispositif

L'équipement utilisé pour ce test est un bain d'immersion téflonisé d'une capacité de 10 L et d'une profondeur, longueur et largeur appropriées pour maintenir les échantillons.

- Solution Acide sulfurique du 10N
- Un minuteur capable de mesurer 30 min de temps en secondes
- Une solution de nettoyage (un mélange 70% Eau et 30% éthanol).
- Lin spectrophotomètre lambda 1050.

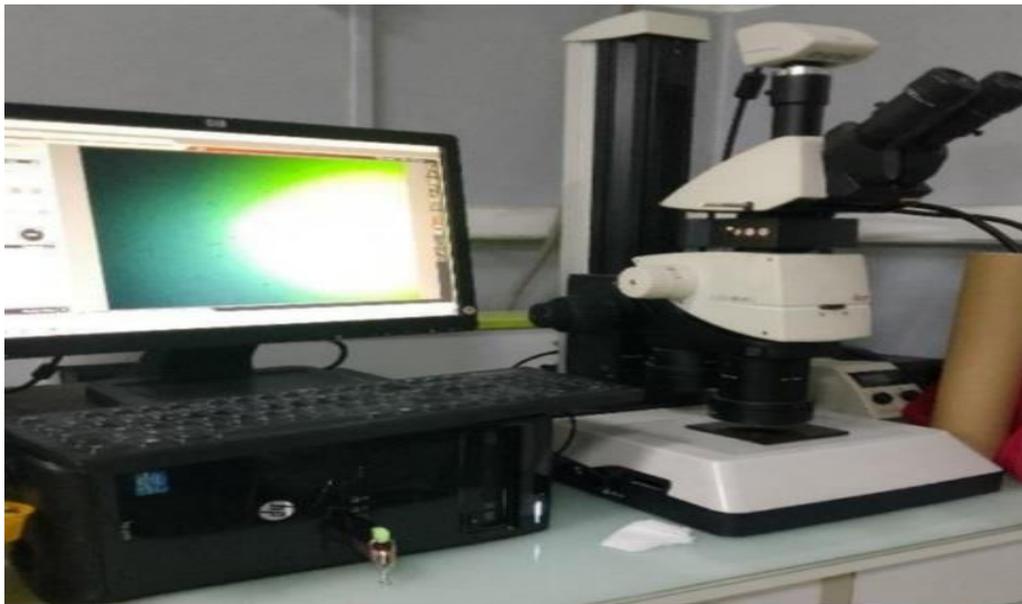
B. Démarche :

Elle consiste à :

- Remplir le bain d'immersion par la solution d'acide sulfurique 10N.
- Mettre en marche le bain d'immersion afin que la solution acide soit chauffée et maintenue à 52 °C
- Nettoyer et sécher les échantillons du verre avec la solution de nettoyage
- Plonger verticalement les échantillons dans le bain puis déclencher le minuteur.
- Mesurer les transmissions lumineuses pour chaque échantillon.

IV.3.4. Microscopie optique

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



FigureIV.6 : Photographie du microscope optique utilisé

CHAPITRE V :

Résultats et discussions

V.1. Corrosion de verre à couche

La corrosion des verres à couche fait référence à la dégradation de la surface du verre qui a été traitée ou revêtue d'une ou plusieurs couches de matériaux spécifiques. Ces traitements, qui peuvent inclure par exemple des revêtements anti-reflets, des couches conductrices ou des couches pour le contrôle solaire, visent généralement à améliorer les propriétés du verre et à le rendre apte pour des usages spécifiques.

La résistance à la corrosion est un facteur important pour la durabilité des verres traités, particulièrement lorsqu'ils sont destinés à des applications extérieures ou dans des environnements agressifs. Les mécanismes de corrosion peuvent être accélérés par plusieurs facteurs, tels que les variations de température, l'humidité, la présence de polluants chimiques dans l'air ou encore l'exposition à des conditions climatiques extrêmes.

V.2. Résultats d'analyse d'échantillons avant et après trempe thermique

V.2.1. Mesures de la Résistivité

Les résultats de de la Résistivité avant et après trempe thermique sont rassemblés dans le tableau (4.1.) :

TableauV.1 : Mesures de la résistivité avant et après la trempe thermique

Nombre de Pièces	Résistivité avant trempe (Ω)	Résistivité après trempe (Ω)
1	54.4	39.5
2	53.4	38.5
3	54.2	37.4
4	54.3	39.9
5	53.5	37.3

L'examen de ces résultats montre que la résistivité diminue après la trempe thermique ou a été appliqué un refroidissement rapide du verre après avoir été chauffé à haute température. Ce processus a pour but de créer des contraintes de compression à la surface du verre tout en laissant l'intérieur en tension. Ces contraintes modifient la structure moléculaire de verre favorisant la mobilité des électrons ainsi sa résistivité électrique

L'avantage que présente le verre trempé est qu'il devient plus conducteur électriquement que le verre ordinaire.

V.2.2. Mesure des indices de couleur (L^* , a^* , b^*) Réflexion du coté couche (Rf) :

Les résultats sont résumés dans le tableau IV.2 ci-dessous :

TableauV.2 : Réflexion du coté couche (Rf) avant et après trempe thermique

Identification supplémentaire	Identification du produit	L*	a*	b*	Rf
Avant trempe	1	71.13	-0.14	8.54	42.38
Après trempe		71.30	-0.19	6,22	42,63
Avant trempe	2	71.57	-0.14	8.41	43.03
Après trempe		73,29	-0,25	5,27	45,61
Avant trempe	3	71.07	-0.14	8.82	42.03
Après trempe		72,38	-0,23	5,82	44,23
Avant trempe	4	71.05	-0.14	8.62	42.26
Après trempe		70,9	-0,28	7,11	42,04
Avant trempe	5	71.39	-0.15	8.59	42.76
Après trempe		73,17	-0,27	5,35	45,42

Ces résultats montrent que la réflexion de côté couche augmente après la trempe thermique, car il y a un changement des indices de couleur indique les changements de propriété de verre (mécanique, chimique et physique).

V.3. Résultats de test d'abrasion

Avec l'évolution incessante des exigences industrielles en termes de qualité et de performance, la résistance à l'abrasion des matériaux a pris une place centrale dans la recherche et le développement de nouveaux produits.

TableauV.3 : Résultat de la résistivité avant et après test

Echantillon	Avant test	Après	
		300 courses	200 courses
Trempé	40.4	40.4	40.4
Non trempé	53.9	52	52

Ces résultats montrent qu'il n'y a pas de changement dans les deux échantillons donc pas d'abrasion et donc pas de rayures visibles.

V.4. Résultats de test de corrosion à condensation humidités

TableauV.4 : Résultats de la résistivité de test corrosion humide

Echantillons	Identifications	Résistivité R (Ω)
9 Trempé	Avant	40,4
	7 jours	41,1
	11 jours	41,9
	13 jours	46,4
	14 jours	47,7
9'Non trempé	Avant	54,4
	7 jours	54,9
	11 jours	58,0
	13 jours	58,6
	14 jours	59,3

TableauV.5 : Résultat de Réflexion de côté couche

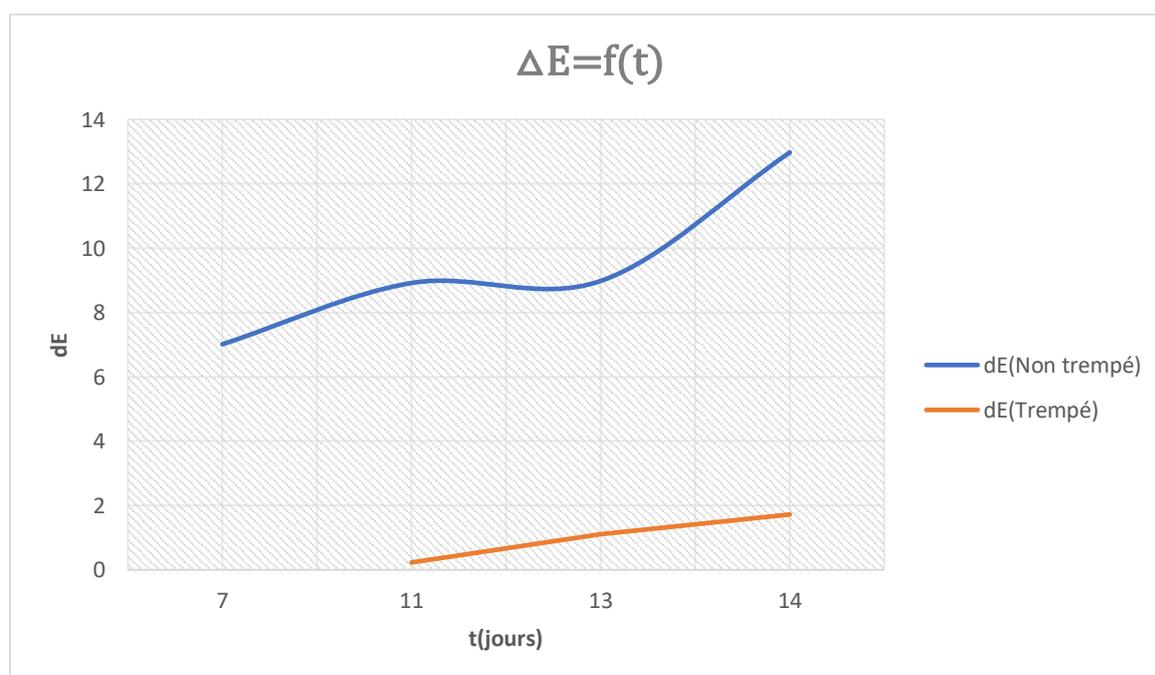
Échantillons	Identification du produit	L*	a*	b*	Rf	ΔE
Non trempé	Avant	71,25	-0,14	8,41	42,55	
	Après 7 Jours	75,7	-0,11	2,99	49,4	7,0128311
	Après 11 Jours	76,37	-0,07	1,11	50,49	8,9167987
	Après 13 Jours	76,56	-0,08	1,17	50,8	8,9787137
	Après 14 Jours	76,3	-0,06	1,05	50,38	12,972837
Trempé	Avant	70,86	-0,29	7,13	41,99	
	Après 11 Jours	70,89	-0,34	6,91	41,92	0,2291287
	Après 13 Jours	71,04	-0,34	6,03	42,24	1,1157508
	Après 14 Jours	71,54	-0,34	5,55	42,98	1,7208428



FigureV.1 : Photo montrant les échantillons de verre à couche non trempé avant et après le test de corrosion humide



FigureV.2 : Photo montrant les échantillons de verre à couche trempé avant et après test corrosion humide



FigureV.3 : Graphes représentant les indices de changement de couleur d'échantillon trempé et non trempé après test de corrosion en fonction de temps

D'après le graphe, il y a une augmentation très importante l'indice de changement de couleur pour l'échantillon non trempé, par rapport une faible augmentation de l'indice de changement de couleur pour l'échantillon trempé.

D'autre part, nous remarquons que $\Delta E > 4$ de l'échantillon non trempé et dans l'échantillon trempé $\Delta E < 4$ confirmants ainsi une dégradation de couleur dans l'échantillon non trempé.

En effet, un échantillon résistant à la corrosion doit obéir à la condition $\Delta E < 4$ et donc un verre trempé est plus résistant à la corrosion par rapport à un verre non trempé.

V.5. Résultats de durabilité chimique par rapport à NaCl (Test brouillard salin) :

Les résultats de test de brouillard salin sont résumés dans le tableau 4.6. ci-dessous :

Tableau V.6: Résultats de la résistivité

Echantillon	Avant test	Après						
		2 jours	3 jours	4 jours	8 jours	10 jours	17 jours	22 jours
Trempé	38,0	38,0	38,0	38,0	38,0	38,3	42,2	51,2
Non trempé	53,8	53,8	53,8	53,8	53,8	55,3	59,3	59,5

Tableau V.7 : Résultat de Réflexion film

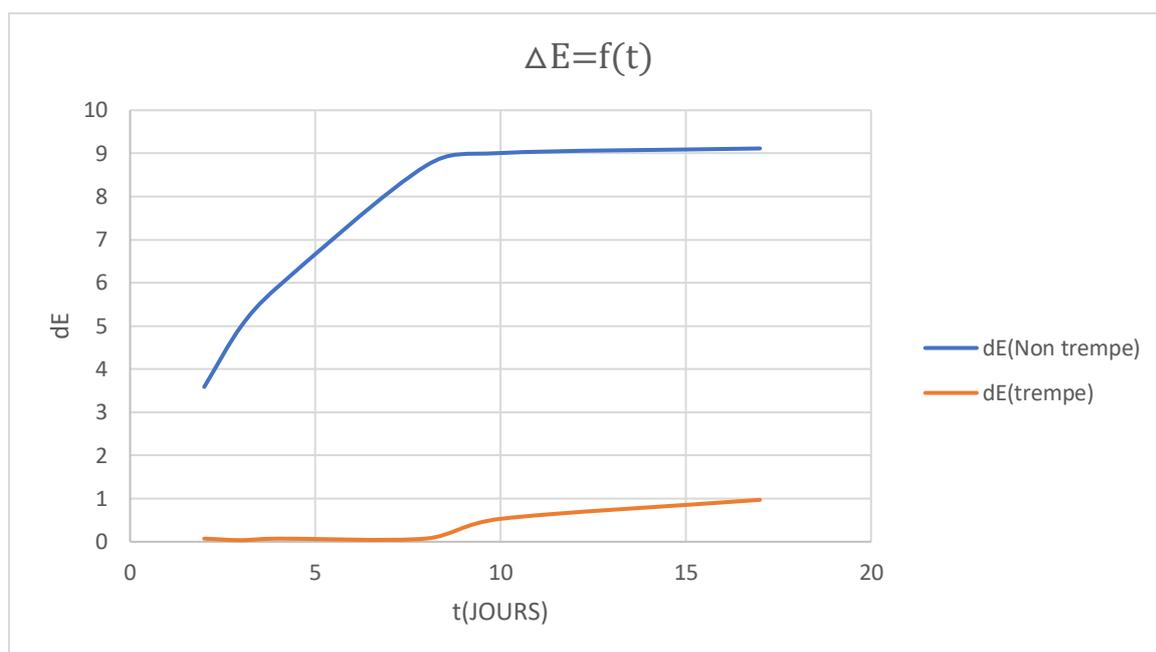
Échantillons	Identification	L*	a*	b*	Rf	ΔE
Non trempé	Avant	71,56	-0,16	8,32	43,01	
	Après 2 Jours	73,67	-0,11	5,42	46,19	3,5867255
	Après 3 Jours	74,62	-0,1	4,37	47,67	4,9969690
	Après 4 Jours	75,33	-0,11	3,67	48,8	5,9168403
	Après 8 Jours	77,19	-0,08	1,66	51,85	8,7211753
	Après 10 Jours	76,71	-0,07	0,93	51,05	9,0079242
	Après 17 Jours	77,03	-0,07	1,03	51,57	9,1144445
Trempé	Avant	71,3	-0,19	6,22	42,63	
	Après 2 Jours	71,34	-0,18	6,16	42,68	0,072801
	Après 3 Jours	71,28	-0,19	6,19	42,6	0,0360555
	Après 4 Jours	71,34	-0,18	6,16	42,69	0,0728011
	Après 8 Jours	71,36	-0,21	6,18	42,72	0,0748331
	Après 10 Jours	71,66	-0,16	5,83	43,16	0,5316013
	Après 17 Jours	73,2	-0,3	4,6	45,47	0,9708750



FigureV.4 : Photo montrant les échantillons de verre à couche non trempé avant et après test de brouillard salin



FigureV.5 : Photo montrant les échantillons de verre à couche trempé avant et après test de brouillard salin



FigureV.6 : Graphe représentant les indices de changement de couleur d'échantillon trempé et non trempé après test de brouillard salin en fonction de temps

Graphiquement, il y a une augmentation très importante de l'indice de changement de couleur dans l'échantillon non trempé ($\Delta E > 4$ d'après quatrième jours), et une faible augmentation dans l'échantillon trempé.

On conclut que l'échantillon trempé garde ses propriétés contrairement à l'échantillon non trempé qui a été dégradé.

V.6. Résultats de durabilité chimique par rapport à Acide Sulfurique (Test d'immersion) :

Les résultats de test immersion sont résumés dans le tableau 4.8 ci-dessous :

TableauV.8 : Résultats de transmission

Échantillons	Identification du produit	L*	a*	b*	T	ΔE	$\Delta TL(\%)$
Non trempé	Avant test	45,58	-1,08	-4,35	14,96		
	Après test	45,83	-1,08	-4,44	15,15	0,2581	0,25
Trempé	Avant test	46,11	-1,12	-6,77	15,35		
	Après test	46,11	-1,13	-6,71	15,35	0,0608	0

Avec :

Le taux de perte de la couche :

$$\Delta TL = \frac{LT_2 - LT_1}{LT_3 - TL_1} * 100$$

LT₁ : le taux de transmission de lumière visible pour l'échantillon non immergé LT₂ : le taux de transmission de lumière visible pour l'échantillon immergé

LT₃ : le taux de transmission de lumière visible pour le verre original (sans couche).

On remarque que :

-ΔE<4 dans les deux échantillons donc pas de dégradation de couleurs.

-La perte de couche est négligeable dans les deux.

On conclut donc que les deux échantillons résistent à la corrosion dans ce test.

V.7. Résultat Test de vieillissement UV :

La durabilité des matériaux dans le temps est un critère primordial, en particulier pour ceux destinés à des applications extérieures où ils sont sujet au rayonnement UV provenant du soleil.

Les résultats de test vieillissement sont résumés dans le tableau IV.9 ci-dessous :

Tableau V.9 : Mesure de test vieillissement UV

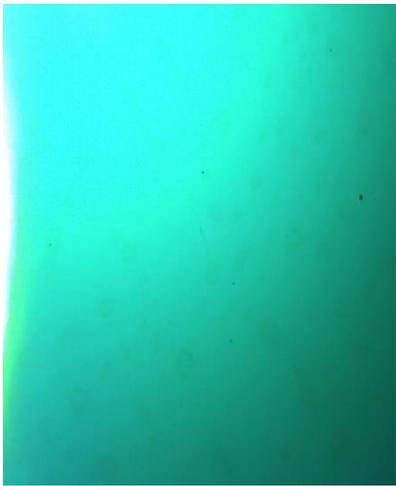
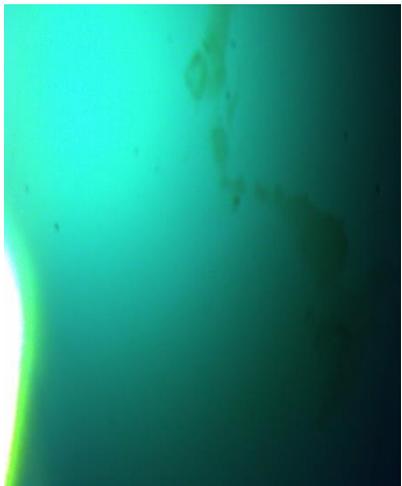
Échantillon	Id	L	A	B	T _{Vis} %	T _{Solar} %	A _{Solar} %	T _{UV} %	G %	dE
Trempe	Avant test	74,48	- 0,18	5,39	14,23	12,33	39,61	10,65	11,74	
	Après test	74,35	- 0,16	5,57	14,31	12,42	39,70	10,68	11,82	0,22
Non trempé	Avant test	61,77	1,32	29,83	14,97	11,10	50,67	9,03	10,39	
	Après test	61,56	1,43	30,31	15,04	11,18	50,51	9,18	10,46	0,54

On remarque que pas de grands changements des indices de la transmission et la réflexion dans tous les domaines.

Alors le verre à couche trempé est non-trempé résiste au rayonnement UV

V.8.Résultats de Macroscopie optique :

Dans cette mesure, on confirme la présence de corrosion dans l'échantillon non trempé comme indiqué les photos de tableau V.10 :

	Avant test	Après test
Chambre humide		
Brouillard salin		

On remarque que on a des piqueurs qui représente la corrosion dans l'échantillon de verre à couche non trempé.

Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion, cette étude comparative a démontré que la résistance à la corrosion des verres à couche est significativement influencée par le processus de traitement thermique. Le verre trempé a exhibé une supériorité notable en termes de durabilité et de persistance face aux agents corrosifs par rapport à son homologue non trempé. Cette robustesse accrue est attribuable à la structure modifiée du verre induite par la trempe, qui confère une meilleure résistance aux épreuves environnementales, notamment dans des conditions de forte salinité.

Il est donc essentiel pour les fabricants et les usagers de prendre en compte les avantages de la trempe lors du choix du verre pour des applications susceptibles d'être exposées à la corrosion. Ces résultats constituent une contribution importante dans le domaine des matériaux de construction et peuvent guider les futures recherches vers l'optimisation des traitements de surface pour renforcer encore plus la durabilité du verre.

Cependant, il est recommandé d'entreprendre des études supplémentaires pour explorer d'autres types de traitements et de revêtements protecteurs afin d'améliorer la résistance à la corrosion du verre non trempé, garantissant ainsi une plus grande variété de choix pour des utilisations spécifiques tout en gardant un œil sur l'économie des coûts.

Bibliographie

Références Bibliothèques :

- [1] B. Dubois, J. J. Videau, and J. Portier, J. Non-Cryst. Solids 88, 355 (1986).
- [2] G. Poirier, M. Poulain, and M. Poulain, J. Non-Cryst. Solids 284, 117 (2001).
- [3] M. Yamane & Y. Asahara « Glasses for Photonics » Cambridge University Press 2000.
- [4] J. Zarzycki, Les verres et l'état vitreux, Edition Masson, Paris, 1982.
- [5] J. Phalippou « Verres Propriétés et application. » Technique de l'ingénieur 2006.
- [6] <https://infovitrail.com/contenu.php/fr/d/---les-proprietes-du-verre/eb96853d-c67e-4ec6-b993-479cb5a07cf8>
- [7] <https://www.kissplanet.shop/blog/cuisine-zero-dechet-7/comment-fonctionne-la-fabrication-du-verre-134>
- [8] <https://www.paprec.com/fr/solutions/les-matieres-que-nous-valorisons/verre/la-fabrication-du-verre/>
- [9]<http://www.primeverre.com/tout-sur-le-verre/proprietes/#:~:text=La%20propri%C3%A9t%C3%A9%20optique%20la%20plus,le%20verre%20et%20la%20lumi%C3%A8re>
- [10] H. Mohamed et h. Ahmed, caractérisation d'un verre plat float glass érode par sablage, Mémoire master université de Boumerdes, 2017
- [11] <https://www.glastroesch.com/ch/fr/services/connaissances-specialisees/le-verre-et-ses-applications/le-materiau-de-construction-le-verre/proprietes-physiques-et-chimiques-du-verre-plat>
- [12] <https://material-properties.org/fr/fibre-de-verre/>
- [13] <http://acertus.es/fr/verre-lamine-vs-verre-trempe-savoir-la-difference/>
- [14] <https://www.clicours.com/generalites-sur-les-couches-minces/>
- [15] Les verres à couches; Serge ETIENNE. Laboratoire de physique des matériaux, NANCY
- [16] Serge Etienne, Laboratoire de Physique des verres à couches, 1ère partie Matériaux, UMR CNRS 7756. Nancy Pôle Verrier Cerfav, janvier 09
- [17]<https://www.bipv.ch/index.php/fr/faq>
- [18] <https://www.internorm.fr/actus/vitrage/les-verres-a-couches-kesako/>
- [19] Les verres à couches, 1ère partie, Serge Etienne, Laboratoire de Physique des Matériaux, UMR CNRS 7756, Nancy , Pôle Verrier/Cerfav, janvier 09
- [20] https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Pulv%C3%A9risation_cathodique
- [21] -S.H. Liu, Y. Du, H.H. Xu, C.Y. Il. J. C. Schuster, J. « Alloys Compounds », sous presse (2006).

-N. P, Lyakishev (Ed.), Diagrammes de phases pour les systèmes métalliques binaires », vol.1,
Moscou, Mashinostroenie, russe, 991 p.