

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie des Procédés

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

2^{ème} Année Master

**Etude des propriétés physico-chimique d'un verre à couches de
l'entreprise MFG : comparaison avec d'autres types de verre.**

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie des Procédés des Matériaux

Présenté par :

CHARCHARI Wiem

SEKFALI Ghada

Encadré par :

Pr. SATHA Hamid

Juin 2023

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. SATHA Hamid**, 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 notre co-promoteur **Mr. KOUZA Rachid**, l'ingénieur contrôle qualité d'électroménager de l'entreprise MFG, pour sa patience, sa disponibilité, l'aide qu'il a fournie et les connaissances qu'il a su nous transmettre.

Nous tenons ainsi à remercier **MR. AZZAZI Brahim** et **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 08 Mai 1945 Guelma** 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

Dédicaces

Grace à Dieu tout puissant qui m'a donné le courage, la volonté et la force pour réaliser ce mémoire.

Je dédie ce modeste travail

A vous mes chers parents

Je dédie ce modeste travail qui est le fruit de vos interminables conseils, assistance et soutien morale, en témoignage de nos reconnaissances et nos affections, dans l'espoir que vous en serrer fiers

A mes chères sœurs

Amani, Mayssoune et Djouri à qui je souhaite un avenir radieux plein de réussite

A ma cher amie et sœur Safa

A mon binôme Ghada

A tous ce qui me sont chers

Et finalement à toute la promotion GPM 2023

Wiem

Dédicaces

Dédicaces

Chaque fois qu'on achève une étape importante dans notre vie, on fait une pause pour regarder en arrière et se rappeler toutes ces personnes qui ont partagé avec nous tous les bons moments de notre existence, mais surtout les mauvais.

C'est avec grande joie, je dédie ce mémoire à :

Mes très chers parents

Qui n'ont jamais cessé de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

Mes chères sœurs

Amira, Samah et Aida pour ces soutiens moraux et ses aides précieux depuis toujours.

Tous mes amis sans exception

Roumaïssa, Nihed, Hind, Oulfa, Hasna et tous ceux qui partagent ma vie.

A mon binôme Wiem

Tous ceux qui m'ont aidé, ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage.

Ghada

Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'une étude des étapes de processus de fabrication de verre clair, feuilleté et à couches depuis la matière première jusqu'à l'obtention du produit final. L'industrie du verre comprend la production de verre Float afin d'obtenir du verre plat, ainsi que la production du verre feuilleté et des verres à couches qui font l'objet de notre étude.

Nous avons étudié la conformité des paramètres des verres de l'entreprise verrière Mediterranean Float Glass (MFG) (verre clair et feuilleté) et nous avons fait une étude comparative des propriétés d'un verre de cette dernière avec un verre d'une autre (AGC) dont on a fait des tests de vieillissement UV, de corrosion, d'immersion, de colorimétrie, de trempe. Ainsi que des tests de fragmentation au niveau d'électroménager.

Le contrôle de qualité des verres clair et feuilleté montre que les résultats sont conformes aux normes de l'entreprise, et les résultats des tests des deux types de verres à couches montrent qu'ils ont de bonne isolation thermique, résistance au test de vieillissement UV et de la durabilité chimique.

Mots clés :

Verre float, verre feuilleté, verre à couches, vieillissement UV, corrosion, isolation thermique, durabilité.

ملخص

هذه الأطروحة هي جزء من دراسة الخطوات في عملية إنتاج الزجاج الشفاف والمغلف والطبقات من المادة الخام إلى المنتج النهائي. حيث تشمل صناعة الزجاج إنتاج زجاج عائم للحصول على زجاج مسطح، بالإضافة إلى إنتاج زجاج مصفح و آخر ذو طبقات وهو النوع الذي تم دراسته في هذا المشروع.

لقد درسنا تطابق خصائص الزجاج الخاص بالشركة مع المعايير (الزجاج الشفاف والمصفح) وقمنا بإجراء مقارنة لخصائص زجاج من هذا الأخير مع آخر حيث تم إجراء اختبارات الشيخوخة بالأشعة فوق البنفسجية، والتآكل، والغمر، وقياس الألوان، إخماد. بالإضافة إلى اختبارات التجزئة على مستوى الأجهزة المنزلية.

تظهر مراقبة جودة الزجاج الشفاف والمصفح أن النتائج تتوافق مع معايير الشركة، وتظهر نتائج اختبارات كلا النوعين من الزجاج ذو الطبقات أن لديها عزل حراري جيد ومقاومة لاختبار الشيخوخة بالأشعة فوق البنفسجية ومتانة.

الكلمات المفتاحية

زجاج عائم، زجاج مصفح، زجاج متعدد الطبقات، شيخوخة بالأشعة فوق البنفسجية، تآكل، عزل حراري، متانة

Abstract

This thesis is part of a study of the steps in the production process of clear, laminated and layered glass from the raw material to the final product. The glass industry includes the production of Float glass to obtain flat glass, as well as the production of laminated and layered glass which is the type to study in this project.

We studied the compliance of the glass parameters of the Mediterranean glass company Float Glass (MFG) (clear and laminated glass) and we made a comparative study of the properties of a glass of the latter with a glass of another (AGC) UV aging, corrosion, immersion, colorimetry and quenching tests have been performed. As well as fragmentation tests at the household.

The quality control of the clear and laminated lenses shows that the results comply with the company standards and the results of the tests of both types of layered glass show that they have good thermal insulation, resistance to UV aging test and durability.

Keywords:

Float glass, laminated glass, layered glass, UV aging, corrosion, thermal insulation, durability.

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : La structure du quartz (a) , silice vitreuse (b) et un verre à base de silice et sodium• :Si, O, Na	6
Figure I.2 : Genèse de l'état vitreux	7
Figure I.3 : Substitution de deux molécules SiO ₂ par une molécules Al ₂ O ₃ dans la structure d'un verre de silicate (l'introduction de deux Al fait disparaître deux oxygènes non pontant)	10
Figure I.4 : Représentation schématique d'un réseau cristallin de silice.....	11
Figure I.5 : Représentation schématique de la structure de verre de silice.....	11
Figure I.6 : Variation de la viscosité d'un verre silico-sodo-calcique en fonction de la température ..	13
Figure I.7 : Le verre plat	19
Figure I.8 : Transmission lumineuse du verre plat.....	20
Figure I.9 : Les fibres de verre	21
Figure I.10 : Le verre creux.....	21
Figure I.11 : Le verre à couches.	22
Figure I.12 : Fonctionnement optique du verre à couches	24
Figure I.13 : Verre trempé.....	25
Figure I.14 : Illustration d'un verre feuilleté 44.2.	26
Figure I.15 : Verre feuilleté décoratif.....	26
Figure I.16 : La performance de verre feuilleté Medilam	27

Chapitre II

Figure II.1 : Stock de sable	30
Figure II.2 : Rupture d'une liaison SiO par introduction d'une molécule NaO dans le réseau.....	31
Figure II.3 : Calcin récupéré et stocké	33
Figure II.4 : Stock de la dolomie.....	34
Figure II.5 : Schéma de la ligne MFG	35
Figure II.6 : Four de fusion à MFG.....	37
Figure II.7 : Vue d'en haut du four de fusion	37
Figure II.8 : Le bain d'étain	38
Figure II.9 : Section de bain d'étain.....	39
Figure II.10 : Système de découpe.....	41
Figure II.11 : Technique du parcourt du verre dans le bout-froid.....	42
Figure II.12 : autoclave	44
Figure II.13 : Interaction de la radiation solaire avec un verre à couches.....	49
Figure II.14 : Les différentes méthodes d'élaboration	50
Figure II.15 : Aperçu du système de dépôt des couches.	53
Figure II.16 : Zone de la partie de pulvérisation cathodique.....	55
Figure II.17 : Principe de la pulvérisation cathodique	56

Chapitre III

Figure III.1 : Préparation des échantillons du sable.....	61
Figure III.2 : L'analyse granulométrique.....	62
Figure III.3 : L'appareil de mesure du taux d'humidité.....	63
Figure III.4 : Spectromètre d'analyse de fluorescence de rayon X à MFG	64
Figure III.5 : les produits utilisés pour la préparation de la perle	64
Figure III.6 : Appareil de mesure de la densité.....	65
Figure III.7 : Contrôle par Microscope optique	66
Figure III.8 : Bain thermostatique.....	67
Figure III.9 : Appareil d'étuvage	69
Figure III.10 : Appareil de test pummel	70
Figure III.11 : Catalogue des classes de test pummel	71
Figure III.12 : Chambre UV	72
Figure III.13 : Test de corrosion brouillard salin neutre	73
Figure III.14 : Microscope optique	74
Figure III.15 : Appareil PRO SCAN	77
Figure III.16 : Four à moufle	78
Figure III.17 : Spectrophotomètre	79
Figure III.18 : Fragmentation après chocs	80

Chapitre IV

Figure IV.1 : Courbe d'analyse granulométrique du sable.	84
Figure IV.2 : Courbe d'analyse granulométrique du feldspath.....	85
Figure IV.3 : L'échantillon (perle) avant et après l'analyse par fluorescence X.....	85
Figure IV.4 : Contrôle par Microscope optique de marque Leica (MFG) PPN	88
Figure IV.5 : a) Bulle d'air avec sulfate PPN ; b) Bulle d'air sans sulfate PPN	89
Figure IV.6 : a) Quartz 1 PNN ; b) Quartz 1 (sous la lumière orthogonal) PNN.....	89
Figure IV.7 : a) Quartz 2 PNN ; b) Quartz 2 (sous la lumière orthogonal) PNN.....	90
Figure IV.8 : a) Zircon 1 PPN ; b) Zircon 1 (sous la lumière orthogonal) PPN	90
Figure IV.9 : a) Zircon 2 PPN ; b) Zircon 2 (sous la lumière orthogonal) PNN.....	90
Figure IV.10 : a) Corindon PNN ; b) Corindon (sous la lumière orthogonal) PNN	91
Figure IV.11 : a) Diopside PNN ; b) Diopside (sous la lumière orthogonal) PNN	91
Figure IV.12 : Pierre d'Oxyde d'Etain PNN.....	91
Figure IV.13 : Tâche d'Etain inférieure PPN.....	92
Figure IV.14 : Tâche d'Oxyde d'Etain PPN	92
Figure IV.15 : Résultats de test d'étuvage non conforme.....	94
Figure IV.16 : Résultat de test pummel.....	94
Figure IV.17 : Les échantillons du verre côté film.....	95
Figure IV.18 : Les échantillons du verre côté glass.	95
Figure IV.19 : Pourcentage de transmission en fonction de longueur d'onde avant UV	97
Figure IV.20 : Pourcentage de réflexion côté glass en fonction de longueur d'onde avant UV	97
Figure IV.21 : Pourcentage de réflexion côté film en fonction de longueur d'onde avant UV.....	98
Figure IV.22 : Pourcentage de transmission en fonction de longueur d'onde après UV	98
Figure IV.23 : Pourcentage de réflexion côté glass en fonction de longueur d'onde après UV.....	99

Figure IV.24 : Pourcentage de réflexion côté film en fonction de longueur d'onde après UV.....	99
Figure IV.25 : Le côté film de l'échantillon 1 après 5 jours.....	101
Figure IV.26 : Le coté glass de l'échantillon 1 après 5 jours.....	101
Figure IV.27 : Le côté film de l'échantillon 2 après 5 jours.	102
Figure IV.28 : Le côté glass de l'échantillon 2 après 5 jours.....	103
Figure IV.29 : Le côté film de l'échantillon 2 après 21 jours.....	104
Figure IV.30 : Le côté glass de l'échantillon 2 après 21 jours.	104
Figure IV.31 : Pourcentage de transmission en fonction de longueur d'onde avant test	105
Figure IV.32 : Pourcentage de réflexion côté glass en fonction de longueur d'onde avant test.....	106
Figure IV.33 : Pourcentage de réflexion film en fonction de longueur d'onde avant test	106
Figure IV.34 : Pourcentage de transmission après 5 jours en fonction de longueur d'onde.	107
Figure IV.35 : Pourcentage de réflexion côté glass après 5 jours en fonction de longueur d'onde. ..	107
Figure IV.36 : Pourcentage de réflexion côté film après 5 jours en fonction de longueur d'onde.....	108
Figure IV.37 : Pourcentage de transmission après 21 jours en fonction de longueur d'onde.	108
Figure IV.38 : Pourcentage de réflexion côté glass après 21 jours en fonction de longueur d'onde.	109
Figure IV.39 : Pourcentage de réflexion côté film après 21 jours en fonction de longueur d'onde... ..	109
Figure IV.40 : Micrographie de l'échantillon Solar Bronze 20.....	110
Figure IV.41 : Micrographie de l'échantillon Pyrolytique.....	110
Figure IV.42 : Pourcentage de transmission en fonction de longueur d'onde avant trempe.	113
Figure IV.43 : Pourcentage de réflexion côté glass en fonction de longueur d'onde avant trempe. ..	114
Figure IV.44 : Pourcentage de réflexion côté film en fonction de longueur d'onde avant trempe. ...	114
Figure IV.45 : Le côté film de l'échantillon 2 après 16 min de trempe.	115
Figure IV.46 : Le côté glass de l'échantillon 2 après 16 min de trempe.	115
Figure IV.47 : Pourcentage de transmission en fonction de longueur d'onde après trempe.	115
Figure IV.48 : Pourcentage de réflexion côté glass en fonction de longueur d'onde après trempe. ..	116
Figure IV.49 : Pourcentage de réflexion côté film en fonction de longueur d'onde après trempe.....	116
Figure IV.50 : Le côté film de l'échantillon 2 après 18 min de trempe.	117
Figure IV.51 : Le côté glass de l'échantillon 2 après 18 min de trempe.	117
Figure IV.52 : Le côté film de l'échantillon 2 après 16 et 18 min.	117
Figure IV.53 : Le côté glass de l'échantillon 2 après 16 et 18 min.	118
Figure IV.54 : Pourcentage de transmission avant et après trempe en fonction de longueur d'onde pour l'échantillon 2.	118
Figure IV.55 : Pourcentage de réflexion côté glass avant et après trempe en fonction de longueur d'onde pour l'échantillon 2.....	118
Figure IV.56 : Pourcentage de réflexion côté film avant et après trempe en fonction de longueur d'onde pour l'échantillon 2.....	119

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Principaux constituants du verre	10
Tableau I.2 : Familles du verre	12
Tableau I.3 : Points fixes de viscosité.....	13
Tableau I.4 : Résistance aux chocs thermiques pour différents matériaux	17
Tableau I.5 : Type de rayonnement	18

Chapitre II

Tableau II.1 : Caractéristique du verre float	29
Tableau II.2 : Consommation journalière et provenance des matières premières MFG.....	35
Tableau II.3 : Les zones de l'étenderie	40
Tableau II.4 : Résistance à la flexion, coefficient de sécurité, taux de travail et coefficient d'épaisseur équivalent pour le verre trempé.....	45
Tableau II.5 : Nombres minimum de fragments exigés pour un float trempé thermiquement en cas de bris (selon le pr EN 12150)	46
Tableau II.6 : Comparaison entre les techniques CVD et PVD.....	50
Tableau II.7 : Types de verres à couche produit par MFG ainsi que les métaux déposés et leurs épaisseurs.	51

Chapitre III

Tableau III.1 : ΔLT limites (changement de transition de la lumière).....	76
--	----

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Analyse granulométrique du sable MFG	83
Tableau IV.2 : Analyse granulométrique du feldspath MFG.....	84
Tableau IV.3 : Analyse chimique par fluorescence X du sable.	85
Tableau IV.4 : Analyse chimique par fluorescence X de dolomie.....	86
Tableau IV.5 : Les défauts et les causes	87
Tableau IV.6 : Résultats de test d'ébullition (44.1)	93
Tableau IV.7 : Résultats de test d'étuvage.....	93
Tableau IV.8 : Les paramètres des deux verres.	95
Tableau IV.9 : Résultats avant test UV (échantillon 1).....	96
Tableau IV.10 : Résultats avant test UV (l'échantillon 2)	96
Tableau IV.11 : Résultats de test de corrosion avant et après 5 jours pour l'échantillon 1.	100
Tableau IV.12 : Résultats test de corrosion avant et après 5 jours pour l'échantillon 2.	102
Tableau IV.13 : Résultats test de corrosion avant et après 21 jours pour l'échantillon 2.....	103

Tableau IV.14 : Résultats test de corrosion avant et après 21 jours pour l'échantillon 1.	105
Tableau IV.15 : Résultats test d'immersion pour l'échantillon1	111
Tableau IV.16 : Résultats test d'immersion pour l'échantillon 2.	112
Tableau IV.17 : Résultats test colorimétrie avant et après pour l'échantillon 1.	112
Tableau IV.18 : Résultats test colorimétrie avant et après pour l'échantillon 2.	113
Tableau IV.19 : Résultats de test de fragmentation	119

Table des matières

Introduction Générale	1
Chapitre I Généralités sur le verre	
2. Qu'est-ce qu'un verre.....	3
3. Définition du verre.....	4
4. Transition vitreuse.....	5
5. Composition du verre	7
6. Constituants d'un verre	7
6.1. Oxydes formateurs	7
6.2. Oxyde modificateurs	7
6.3. Oxydes intermédiaires.....	8
7. Description de la molécule de silice.....	9
8. Les familles du verre	10
9. Propriétés du verre	11
9.1. Propriétés rhéologiques.....	11
9.2. Propriétés physiques	13
9.3. Propriétés mécaniques	13
9.4. Propriétés chimiques	15
9.5. Propriétés thermiques	16
9.6. Propriétés optiques.....	17
10. Les Types de verre.....	18
10.1. Les verres plats	18
10.2. Les fibres de verre	19
10.3. Les verres creux.....	20
10.4. Le verre à couches	21
10.5. Les verres transformés.....	23
10.5.1. Le verre trempé	23
10.5.2. Le verre feuilleté	24
Conclusion.....	26

Chapitre II Procédés d'élaboration des différents verres

1.2. Les étapes de fabrication du verre plat Float	29
--	----

1.2.1. La matière première utilise pour la fabrication du verre.....	29
1.3. La ligne de production du verre	34
1) Enfournement	35
2) Le four de fusion (régénérateur).....	35
3) Le bain d'étain.....	37
4) L'étenderie	38
5) Système de découpe (Bou froid).....	40
2. Le verre feuilleté.....	41
2.1. Description du verre feuilleté	41
2.2. Les étapes de production du verre feuilleté	41
3. Le verre trempé	43
3.1. Définition de la trempe.....	43
3.2. Test de fragmentation	44
4. Verre à couches.....	45
4.1. Définition d'une couche mince	45
4.2. Définition d'un verre à couches.....	45
4.3. Structure d'un verre à couches	45
4.4. Le rôle des couches	46
4.5. Les fonctions d'un verre à couches	47
4.6. Techniques de déposition des couches minces	48
4.6.1. La différence entre les deux méthodes d'élaboration de la couche mince.....	48
4.6.2. Principales étapes du processus de fabrication	49
4.7. Déchargeuse à deux côtés.....	50
4.8. Lavage et séchage du verre.....	50
4.9. Dépôt des couches	50
4.10. Principes fondamentaux du processus	53
4.10.1. Pulvérisation cathodique	53
4.10.2. Pulvérisation réactive.....	55
4.10.3. Système de vide.....	55
4.11. Le verre de pulvérisation pyrolytique	55
Conclusion.....	56

Chapitre III : Matériels et méthodes

1.1. Analyse granulométrique.....	58
1.3. Fluorescence des rayons X.....	61
1.4. Densité.....	62
1.5. Microscope optique	63
1.6. Les contrôles optiques visuels.....	64
2. Verre feuilleté.....	65
2.1. Test d'ébullition.....	65
2.2. Test à haute température (étuvage).....	66
2.3. Test pummel.....	67
3. Verre à couches.....	69
3.1. Test de vieillissement UV	69
3.2. Test de corrosion.....	70
3.3. Test de durabilité chimique accélérée (test d'immersion).....	72
3.4. Test de colorimétrie	74
3.5. Test de trempe thermique.....	75
Conclusion.....	78

Chapitre IV : Résultats et discussion

I. Les tests du Verre clair.....	80
I.1. Analyse granulométrique	80
I.1.1. Sable	80
I.1.2. Feldspath	81
I.2. Analyse par fluorescence X.....	82
I.2.1. Sable	82
I.2.2. Dolomie	83
I.3. Analyse de produit fini et l'identification des types de défauts dans le verre float.....	83
I.3.1. Définition d'un défaut de verre	83
I.3.2. Types des défauts du verre float.....	83
I.3.3. Les défauts et les causes.....	84
I.3.4. Techniques expérimentales (Analyses optique)	84
2. Pierre de Quartz.....	85
3. Pierre de Zircon	86

4. Corindon.....	87
5. Pierre de Diopside.....	87
6. Pierre d'Oxyde d'Etain	88
7. Tâche d'Etain inférieure	88
II.1. Test d'ébullition	89
II.2. Test à haute température (étuvage)	89
II.3. Test Pummel.....	90
III. Verre à couches	91
III.1. Test de vieillissement UV	92
III.2. Test de corrosion	96
III.2.1. Observation microscopique après test de corrosion	106
III.3. Test de durabilité chimique accélérée (test d'immersion).....	107
III.4. Test de colorimétrie.....	108
III.5. Test de trempe thermique	109
IV. Les analyses effectuées au niveau d'électroménager (trempe thermique).....	115
IV.1. Test de fragmentation	115
Conclusion générale	116
Références Bibliographiques.....	118
Les Annexes	121

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 Mediterranean Float Glass (MFG), qui se situe à l'Arbâa 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 suivre le processus de fabrication des verres plats en général, le verre feuilleté, le verre trempé (électroménager) et le verre à couche en particulier tout en passant par les matières premières minérales de base utilisées dans cette usine. En outre, les principaux paramètres physiques et chimiques requis dans le procédé de fabrication des verres à couche sont identifiés.

Il s'agit de suivre les propriétés physico-chimiques des deux verres à couches différents. Pour cela, on s'est intéressé à l'étude comparative de deux échantillons de verre, (verre à couche Solar Bronze 20) et un échantillon de verre Stop Sol Classic Bronze (pyrolytique)

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 physiques et chimiques. Les procédés d'élaboration et de synthèse du verre seront détaillés dans le chapitre II. Un intérêt particulier sera donné aux verres clairs, feuilletés, trempés et à couches.

Les différents 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 seront exposés au quatrième chapitre.

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

Chapitre I
Généralités sur les verres

Chapitre I : Généralités sur les verres [1-7]

Introduction

Le verre est une matière qui possède théoriquement un nombre illimité de possibilités de composition. C'est pour cela que ses propriétés sont également très diverses, ce qui a ouvert de nombreux champs d'utilisation.

1. Historique du verre

Le verre est l'une des meilleures créations de l'humanité. Il a été inventé à l'âge du Bronze, bien que la nature l'ait créé depuis fort longtemps avec les verres issus des roches volcaniques. La localisation de la première production est encore indéterminée entre la Mésopotamie, l'Égypte et la Syrie. La découverte de ce matériau reste liée à des opérations de métallurgie ou de céramique. Les plus anciens verres découverts ont des compositions similaires à ceux d'aujourd'hui. Ces verres n'étaient pas transparents mais opaques et colorés par des métaux tels que le cuivre, le cobalt, le fer, l'antimoine ou l'étain. Ces métaux donnent une coloration rouge ou bleu-rouge pour le cuivre, bleu pour le cobalt, noir, vert-brun pour le fer, jaune pour l'antimoine et blanc pour l'étain. Mais l'identification de ces colorants n'a été faite qu'à une époque proche.

L'industrie du verre soufflé est apparue aux Ve et Xe siècles, 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.

2. Qu'est-ce qu'un verre ?

Les solides ont notamment l'avantage de ne pas pouvoir 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 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.

En résumé, on peut retenir pour le verre la définition proposée par Zarzycki : « Le verre est un solide non cristallisé qui présente le phénomène de la transition vitreuse ».

3. Définition du verre

La première question qui se pose quand on veut étudier le verre est tout d'abord de savoir à quoi correspond réellement le verre : quelles sont les propriétés, les comportements physiques, les composants ou la structure permettant de déclarer qu'un matériau quelconque est un verre ?

Le verre le plus couramment utilisé est constitué de silice, mais cet élément n'est pas incontournable pour élaborer un verre, et donc n'est pas un critère de définition du verre.

Le verre étant un solide, on s'intéresse aux propriétés des solides. Ceux-ci se répartissent en deux catégories : les solides cristallisés et les solides amorphes. Dans un solide amorphe, l'arrangement des atomes est aussi désordonné que dans un liquide. L'ordre à longue distance, c'est-à-dire au-delà de l'échelle de la distance interatomique, que l'on trouve dans les cristaux n'existe plus. Le verre ne présente aucun arrangement atomique au-delà de la distance interatomique : pour un verre à base de silice il est impossible de prédire la position d'un atome de silicium ou d'oxygène à grande distance. La figure I.1 montre la différence de structure entre le quartz, la silice vitreuse et un verre à base de silice et de sodium.

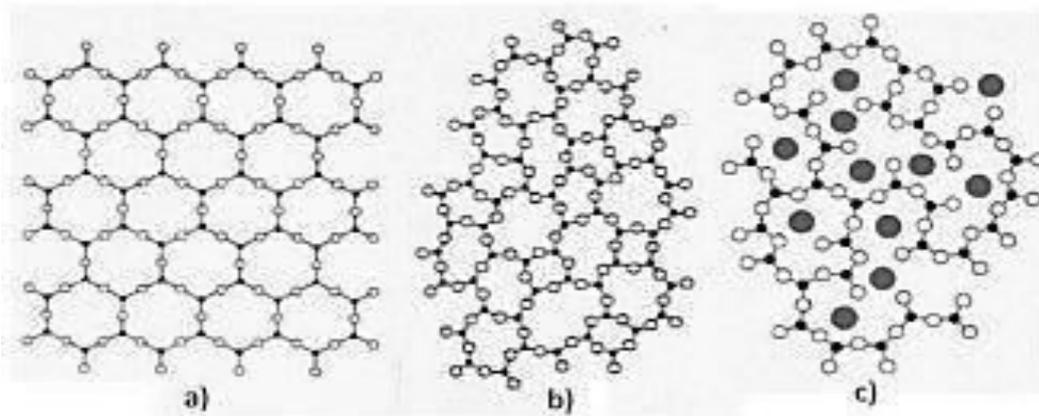


Figure I.1 : La structure du quartz (a), silice vitreuse (b) et un verre à base de silice et sodium • : Si, O, Na.

Définition opérationnelle du verre : « Le verre est un solide obtenu par figeage d'un liquide qui n'a pas cristallisé ». Cette définition restreint le terme verre aux seuls produits obtenus par trempe d'un liquide.

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

Les verres classiques sont caractérisés par une absence de cristallinité, et par leur faculté de passer progressivement et réversiblement à un état de plus en plus fluide lorsqu'on élève la température. Au cours de ce passage, on assiste à une modification des propriétés qui traduisent ce que l'on appelle la transition vitreuse. L'état physique correspondant est appelé état vitreux. Cette propriété est fondamentale dans les applications techniques.

4. Transition vitreuse

Le phénomène de la transition vitreuse est bien illustré par l'évolution du volume en fonction de la température. La figure I.2 montre schématiquement l'exemple d'un liquide suffisamment visqueux à la température du liquide T_L pour franchir cette température sans cristalliser.

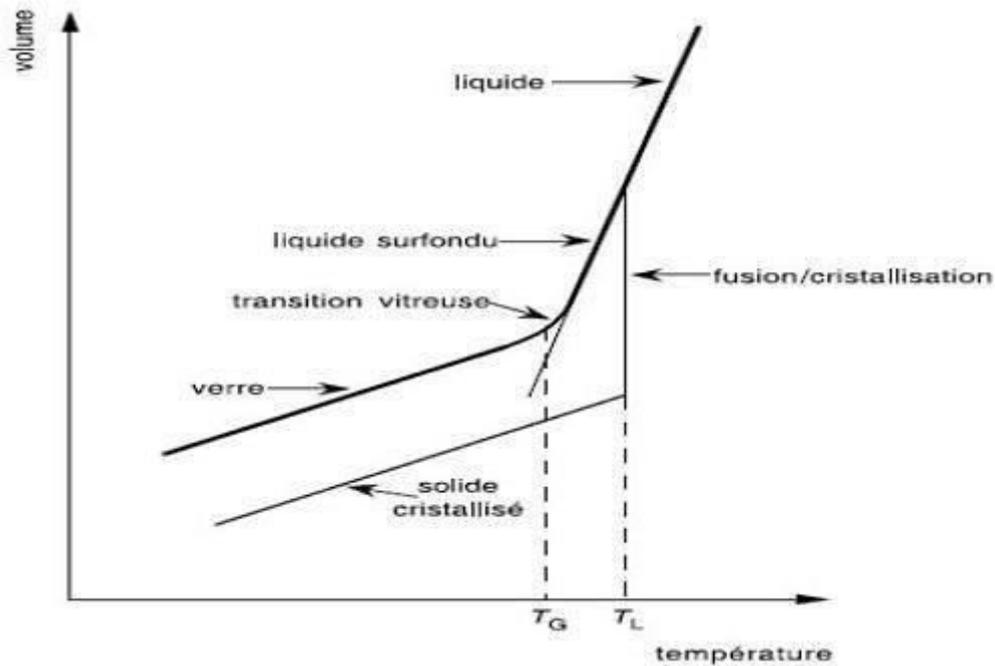


Figure I.2 : Genèse de l'état vitreux

On voit sur cette figure que le volume au-dessous de T_L se situe d'abord dans l'extrapolation des valeurs qu'il prend au-dessus de T_L . Mais à la température de transition vitreuse T_G où la viscosité atteint environ 10^{12} Pa.s, il y a une diminution significative de la pente de la courbe de variation qui devient proche de celle que présente le solide cristallisé. En revanche à cette température T_G , on n'observe pas de changement brutal du volume comme c'est le cas lorsqu'il y a passage de l'état liquide à l'état solide. Ceci montre qu'il n'y a pas de variation structurale au passage de T_G . La substance obtenue au-dessous de T_G , qui a la structure du liquide mais les propriétés du solide, est le verre.

La transition vitreuse s'observe aussi en suivant les variations, en fonction de la température, de diverses propriétés comme l'indice de réfraction, l'enthalpie, la conductivité électrique : on constate systématiquement à T_G un changement de la pente de la courbe représentative de la propriété en fonction de T .

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

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

5. Composition du verre

La silice SiO_2 est le principal composant des verres actuellement fabriqués, mais elle n'est pas le seul composé permettant de former du verre. D'autres oxydes, dits "formateurs", peuvent être utilisés pour fabriquer des verres. Ces verres sont d'ailleurs qualifiés de "verre d'oxydes". Les oxydes formateurs les plus utilisés dans l'industrie verrière sont la silice (SiO_2), l'oxyde de Bore (B_2O_3), et l'oxyde de Phosphore (P_2O_5). De nombreux autres oxydes peuvent être utilisés pour certains verres spécifiques : GeO_2 , As_2O_3 , Bi_2O_3 , Sb_2O_3 , TeO_2 , Al_2O_3 , Ga_2O_3 et V_2O_5 . L'emploi majoritaire de la silice est principalement dû à sa présence en grande quantité dans le monde entier, et donc à son faible coût. Il subsiste cependant un problème de taille à l'emploi de la silice : sa température de fusion très élevée. Elle est en effet de $1723\text{ }^\circ\text{C}$, et le liquide obtenu est très visqueux. Ceci implique donc de monter à une température supérieure à $2000\text{ }^\circ\text{C}$ pour pouvoir mettre en forme la silice vitreuse. Cette température de fusion élevée peut cependant être abaissée par l'ajout de produits, que l'on appelle des "fondants".

L'exemple historique de fondant est le sel alcalin naturel, appelé natron. L'ajout de Na_2O va modifier la structure de la silice vitreuse, en coupant des chaînes de $\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$ en groupements de $-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$. Ils transforment donc des oxygènes pontants en oxygènes non pontants. Ce sont ces transformations qui vont induire une diminution de la température de fusion du verre. Les oxydes alcalino-terreux peuvent également jouer le rôle de fondants, en coupant de la même manière les liaisons du réseau primaire formé par les oxydes formateurs. Il existe une troisième catégorie d'oxydes, dont l'action est beaucoup moins clairement définie : les oxydes "intermédiaires". Ces oxydes vont en effet pouvoir agir soit en tant que formateurs, soit en tant que modificateurs, selon la composition du verre.

6. Constituants d'un verre

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

6.1. Oxydes formateurs

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 SiO_2 avec un taux d'impuretés inférieur à 0,2%.

6.2. Oxyde modificateurs

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 en industrie « soude » et « potasse », sont introduits sous forme de « fondants ».

Les compositions sont essentiellement à base de carbonate de sodium. 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. 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.

6.3. Oxydes intermédiaires

Il existe une autre catégorie d'oxydes entre les formateurs et les modificateurs dont la fonction est moins nettement définie et qui peuvent jouer, selon la composition du verre, le rôle de formateur ou de modificateur. On les appelle oxydes intermédiaires. Un exemple est constitué par BeO , MgO et ZnO . S'il y a peu d'ions alcalins dans le verre, Be^{2+} , Mg^{2+} et Zn^{2+} jouent le rôle d'ions modificateurs en créant deux oxygènes non-pontant. En revanche, s'il y a suffisamment d'ions alcalins, Be^{2+} , Mg^{2+} et Zn^{2+} peuvent se placer en position tétraédrique, l'équilibre des valences étant apporté par deux ions alcalins voisins. BeO , MgO et ZnO jouent alors le rôle de formateurs de réseau.

La présence des alcalins à une influence analogue sur le rôle joué par Al_2O_3 . Quand il est seul cet oxyde ne vitrifie pas. Introduit dans la silice pure, Al^{3+} adopte la coordinence 6, inapte à la formation d'un réseau vitreux. Al_2O_3 joue alors le rôle de modificateur. Mais lorsque Al_2O_3 est introduit dans un verre contenant des alcalins, il devient possible à Al^{3+} de se substituer à Si^{4+} dans le réseau si, à son voisinage, se trouve un Na^+ qui compense la charge négative excédentaire (Figure I.3). Chaque Al_2O_3 introduit fait disparaître la paire d'oxygènes non-pontant qui était associée aux deux ions sodium.

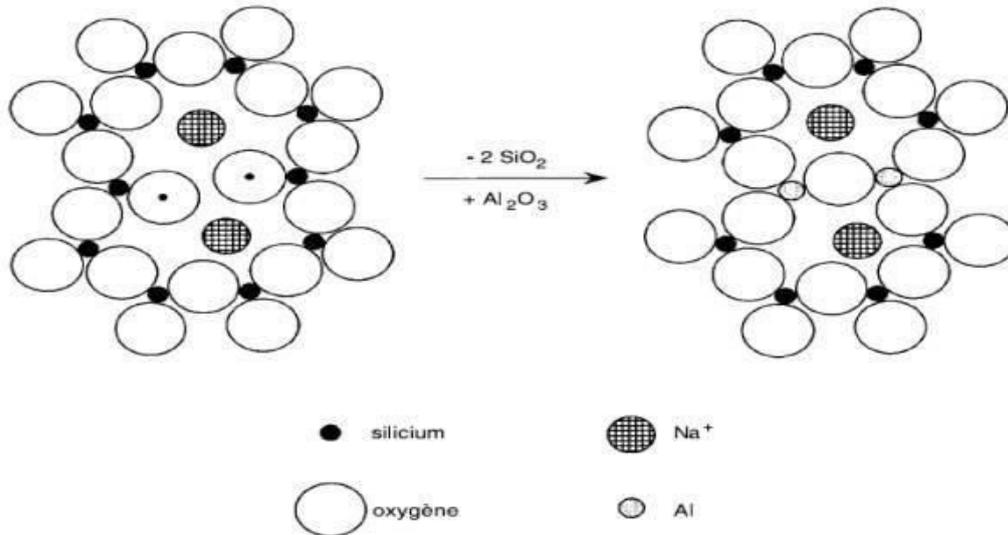


Figure I.3 : Substitution de deux molécules SiO_2 par une molécule Al_2O_3 dans la structure d'un verre de silicate (l'introduction de deux Al fait disparaître deux oxygènes non pontants)

Tableau I.1 : Principaux constituants du verre

Formateurs					
SiO_2	P_2O_5	V_2O_5	B_2O_3	GeO_5	Sb_2O_3

Modificateurs				
CaO	PbO	Li_2O	Na_2O	K_2O

Intermédiaires					
Al_2O_3	TiO_2	ZrO_2	BeO	MgO	ZnO

7. Description de la molécule de silice

Chaque atome de silicium est placé au centre d'un tétraèdre et lié à quatre atomes d'oxygène (figure I.4). Ces tétraèdres sont liés ensemble par le sommet de telle sorte que chaque atome d'oxygène est lié à deux atomes de silicium.

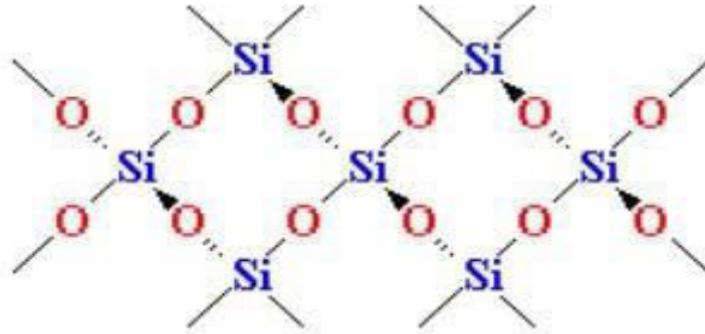


Figure I.4 : Représentation schématique d'un réseau cristallin de silice

Dans le cas du verre où chaque molécule de silice est identique (tétraèdre) mais où l'organisation des uns et des autres est inexistante (figure I.5). 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.

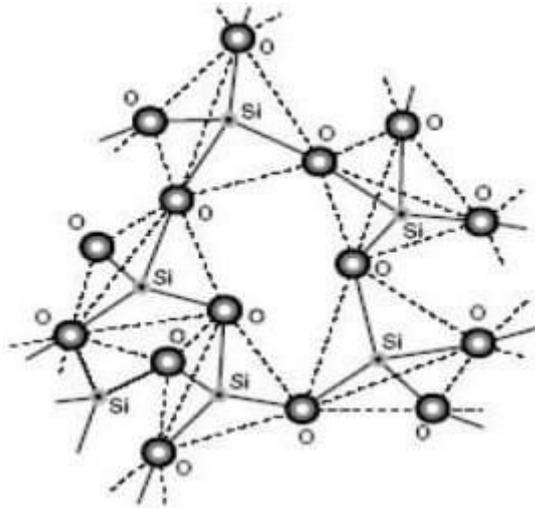


Figure I.5 : Représentation schématique de la structure de verre de silice

L'Anhydride borique B_2O_3 est un formateur couteux, souvent il est associé à la silice (verres borosilicatés) introduit sous forme de $B(OH)_3$ pur, ou plus communément sous forme de borax $2B_2O_3 \cdot Na_2O$ anhydre ou hydraté. Les verres courants contiennent moins de 1% de B_2O_3 . L'anhydride phosphorique P_2O_5 entre dans la composition de verres spéciaux.

8. Les familles du verre

Les principales familles du verre sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.2 : Familles du verre

Familles du verre	Composants du verre	Principales applications
Sodo-calcique	SiO ₂ CaO Na ₂ O	Vitrage, bouteilles, flacon et verre à boire
Borosilicate	SiO ₂ B ₂ O ₃ Na ₂ O	Pharmacie, Laboratoire et culinaire
Aluminosilicate	SiO ₂ B ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ Na ₂ O	Fibre de renforcement
Cristal	SiO ₂ PbO K ₂ O	Verrerie d'art Flacon de luxe
Silice	SiO ₂	Fibre optique
Zircone	SiO ₂ ZrO ₂ Na ₂ O	Renforcement du ciment
Bio verres	Na ₂ O CaO SiO ₂ P ₂ O ₅	Médecine
Vitrocéramique	Li ₂ O Al ₂ O ₃ SiO ₂	Culinaire Optique

▪ **Le verre produit à l'entreprise :**

Mediterranean Float Glass MFG, est une entreprise spécialisée dans la production et la transformation du verre Sodo-calcique depuis son lancement, sa composition chimique est la suivante :

- De 71 à 75 % de dioxyde de silice, SiO₂, principalement extrait du sable,
- De 12 à 16 % d'oxyde de sodium, 'soude' Na₂O contenu dans le carbonate de sodium Na₂CO₃,
- De 10 à 15 % d'oxyde de calcium, CaO contenu dans le calcaire – CaCO₃,

Et de petites quantités d'autres composants, destinés à conférer au verre des propriétés spécifiques (Al₂O₃= 1%; MgO = 4.35%; K₂O = 0.5% ; Fe₂O₃ = 0.07%).

9. Propriétés du verre

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

9.1. Propriétés rhéologiques

- **Viscosité**

La viscosité peut être définie comme le frottement interne des liquides. Elle est mesurée en poise, le poise étant la viscosité dynamique d'un liquide opposant une résistance d'une dyne au

glissement dans son plan d'une surface plane d'un centimètre carré, avec un gradient de vitesse d'un centimètre par seconde et par centimètre.

Elle est désignée, par la lettre grecque η . Son inverse, utilisé dans certains calculs, est la fluidité. La viscosité est la caractéristique la plus importante des verres. Sa connaissance est indispensable à leur élaboration et à leur utilisation. Elle conditionne, en particulier, tous les procédés de façonnage (figure I.6).

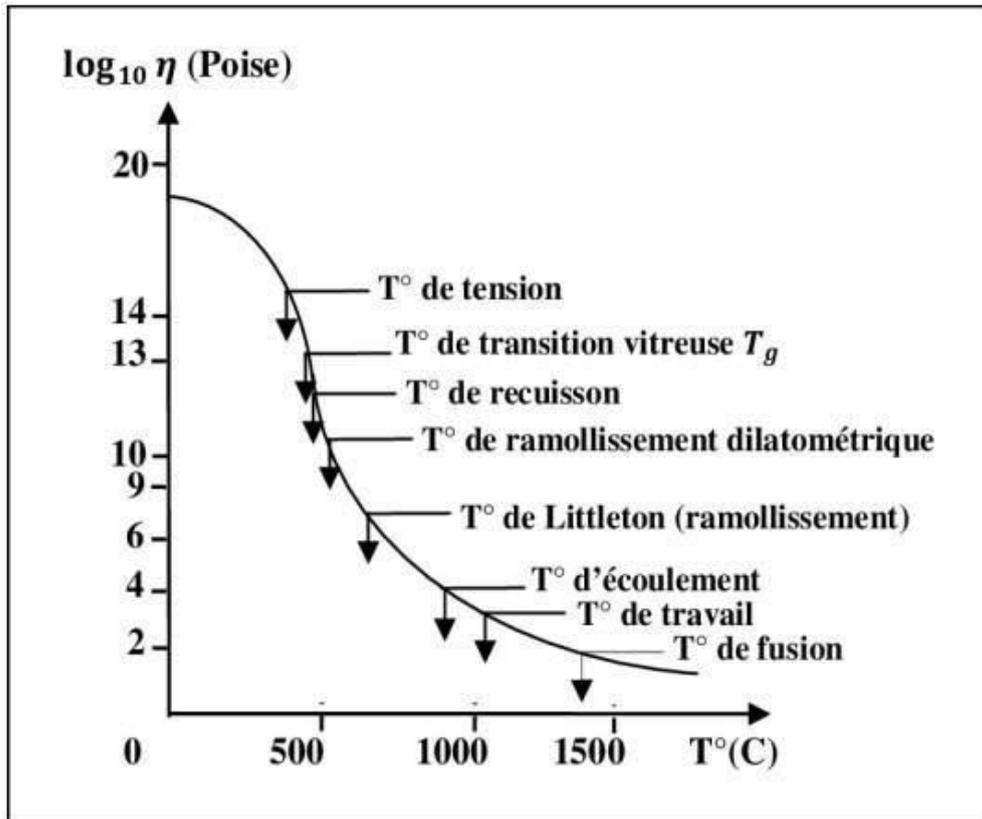


Figure I.6 : Variation de la viscosité d'un verre silico-sodo-calcique en fonction de la température

Tableau I.3 : Points fixes de viscosité

Points Fixes	$\log \eta$. (η en Pa.s)	Opération technique
Température de fusion	1	Fusion et affinage
Température de travail	3	Cueillage, moulage, étirage,
Température de ramollissement	6.65	Soufflage (Littleton)
Température de Ramollissement dilatométrique (point R)	10	Sortie de moule
Annealing point	12	Début de recuisson
Température de transition vitreuse T_g	12	
Strain point	13.5	Fin de recuisson

- **La tension superficielle**

Au sein d'un liquide ou d'un solide isotrope, l'ensemble des forces de liaison auxquelles est soumis un atome ont une résultante nulle, alors que celles qui agissent sur un atome situé à la surface libre ont une résultante f non nulle dirigée vers l'intérieur. Par conséquent pour accroître l'aire de la surface libre, il faut fournir un travail pour transférer les atomes de l'intérieur vers la surface, en s'opposant à la force f . On admet que si la surface libre d'un système thermodynamique augmente de dA , son énergie libre augmente de :

$$dW = \delta \cdot dA \quad (\text{I.1})$$

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

9.2. Propriétés physiques

- **Densité**

La densité du verre est de 2,5, soit une masse de 2,5 kg par m^2 et par mm d'épaisseur pour les vitrages plans. La masse volumique, exprimée dans le système d'unités légal, est de $2\,500 \text{ kg/m}^3$. Un m^2 de verre d'une épaisseur de 4mm a donc une masse de 10 kg.

9.3. Propriétés mécaniques

- **Elasticité**

Un corps est dit élastique si sous l'action d'une force de sollicitation, il engendre une déformation réversible dite élastique ; celle-ci disparaît par suppression de cette force appliquée. Le verre de silice a -à la température ambiante- un comportement linéaire élastique jusqu'à la rupture. Les premières mesures ont montré qu'on peut caractériser un verre par un module d'élasticité. Ça sera le cas si la structure vitreuse est rigide. Il y a en effet une diminution du module d'élasticité quand la teneur en Na_2O augmente, et il en est de même quand la température augmente.

La loi de Hook exprime que la déformation D est proportionnelle à la contrainte δ appliquée.

$$\delta = E \cdot D \quad (\text{I.2})$$

Le Module de Young Verre « Sodocalcique » $E(\text{GPa}) = 70 \text{ à } 73$ [11].

- **Coefficient de Poisson (coefficient de contraction latérale)**

Lorsqu'une éprouvette subit un allongement sous l'influence d'une contrainte mécanique, on constate un rétrécissement de sa section. Le coefficient de Poisson est le rapport entre le

rétrécissement unitaire sur une direction perpendiculaire au sens de l'effort et l'allongement unitaire dans la direction de l'effort. Pour les vitrages du bâtiment, la valeur du coefficient ν est de 0,2.

- **Ténacité**

La ténacité est définie comme étant la capacité d'un matériau à résister à l'initiation et à la propagation des fissures préexistante.

La ténacité peut être considérée comme l'une des plus importantes propriétés des matériaux fragiles. Le comportement fragile à la température ambiante des verres est attribué à une faible ténacité. Elle dépend de la géométrie de la pièce, de la taille des fissures existantes et du mode de chargement.

La ténacité est quantifiée par le facteur d'intensité de contrainte critique K_{Ic} . Nous donnons à titre d'exemple la formule de Laugier proposée pour le système de fissuration Palmqvist.

$$k_{Ic} = 0.01(E/Hv)^2(1/a)^{-1/2}(F/C^{3/2}) \quad (I.3)$$

Et la formule de Anstis et al [12] qui est proposée pour le système de fissuration médian/radial

$$k_{Ic} = 0.01(E/Hv)^{1/2}(F/C^{3/2}) \quad (I.4)$$

Où :

k_{Ic} : Facteur d'intensité de contrainte critique ;

F : Charge d'indentation ;

$2c$: Longueur de deux fissures radiales adjacentes plus la diagonale de l'empreinte ;

$2a$: Diagonale de l'empreinte Vickers ;

Hv : Dureté Vickers.

k_{Ic} du Verre Sodocalcique [$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$] = 0.72 - 0.82

- **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}) 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 : rayures, 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.

- **Résistance à la flexion**

Un vitrage soumis à la flexion a une face en compression et une face en extension. La résistance à la rupture à la flexion est de l'ordre de :

40 MPa (N/mm^2) pour un verre float recuit.

120 à 200 MPa (N/mm^2) pour un verre trempé (suivant épaisseur, façonnage des bords et type d'ouvrage).

- **Résistance à la compression**

La résistance du verre à la compression est très élevée : $1000 N/mm^2$ ou 1000MPa. Ceci signifie que, pour briser un cube de verre de 1cm de côté, la charge nécessaire est de l'ordre de 10 tonnes.

9.4. Propriétés chimiques

- **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.

- **L'action de l'air** : les silicates alcalins se combinent avec l'acide carbonique contenu dans l'air ce que donne un dépôt blanchâtre à la surface du verre.

- **L'action de la lumière** : exposés aux ultraviolets, certains verres se colorent où se décolorent.

- **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 peut donc être dissout.

9.5. Propriétés thermiques

• Conductivité thermique

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

• Dilatation thermique

Lorsqu'ils sont chauffés, la plupart des solides manifestent des variations dimensionnelles réversibles correspondant au phénomène dit de dilatation thermique, résultant du mouvement des atomes ou groupes d'atomes constituant le solide.

La dilatation thermique est étudiée immédiatement après la viscosité. Coefficients de dilatation du verre sodocalcique

$$\alpha = 8.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

• Résistance aux chocs thermiques

La résistance aux chocs thermiques correspond à la capacité de résister à un changement de température abrupt. Elle est exprimée en degré kelvin et représente la vraisemblance d'un choc thermique, à savoir une rupture suite à une surcharge thermique. Plus la résistance aux chocs thermiques d'un verre est élevée plus le risque de choc thermique est faible. Il n'est cependant pas possible de dériver directement les températures de surface maximales admissibles sur un vitrage à partir de la résistance aux chocs thermiques, car la répartition de la température est un facteur particulièrement décisif (voir tableau I.4).

Tableau I.4 : Résistance aux chocs thermiques pour différents matériaux

Type de verre	Résistance aux chocs thermiques
Verre flotté	40° K
Verre de sécurité trempé (ESG)	150° K
Verre borosilicate	260° K
Verre céramique	>300° K

- **Chaleur spécifique**

La chaleur spécifique représente la quantité de chaleur absorbée par unité de masse du matériau quand il s'échauffe de 1°C. Elle mesure la quantité d'énergie thermique nécessaire pour changer la température du matériau.

Elle croit avec la température et tend vers zéro quand la température tend vers le zéro absolu, et dépend étroitement de la composition chimique. Les verres qui contiennent des constituants, dont la masse atomique est élevée, ont des chaleurs massiques plus faibles.

9.6. Propriétés optiques

Le verre se distingue par sa grande perméabilité au rayonnement dans le spectre solaire. Il s'exprime sous la forme des caractéristiques du verre, qui sont des valeurs de comparaison physiques en matière de rayonnement (Tableau I.5).

Tableau I.5 : Types de rayonnements

Type de rayonnement	Plage de longueur d'onde	Part (énergétique)
Rayons ultraviolets	320 à 380 nm	Environ 4%
Rayons lumineux visibles	380 à 780 nm	Environ 45%
Rayons infrarouges	780 à 3000 nm	Environ 51%

- **Transmission de la lumière / taux de transmission lumineuse (TL)**

Le taux TL d'un vitrage correspond à la proportion en pour-cent du rayonnement solaire dans la plage de lumière visible (380 à 780 nm) transmise de l'extérieur vers l'intérieur.

- **Absorption de la lumière / taux d'absorption lumineuse (AL)**

Le taux AL correspond à la proportion du rayonnement solaire dans la plage de lumière visible (380 à 780 nm) absorbée par le vitrage. L'absorption de la lumière est une valeur caractéristique moins utilisée que les autres.

- **Réflexion de la lumière / taux de réflexion lumineuse (RL)**

Le taux RL exprime la proportion en pour-cent du rayonnement solaire dans la plage de lumière visible (380 à 780 nm) réfléchi par le vitrage.

10. Les Types de verre

10.1. Les verres plats

Les vitres étaient jadis fabriqués 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.



Figure I.7 : Le verre plat

❖ Performance

- Transmission lumineuse élevée: bon éclairage naturel des espaces intérieurs.
- Larges possibilités de création architecturale, utilisé en simple ou double vitrage.
- Les performances spectrophotométriques des verres MFG sont données en simple vitrage pour toutes les épaisseurs.

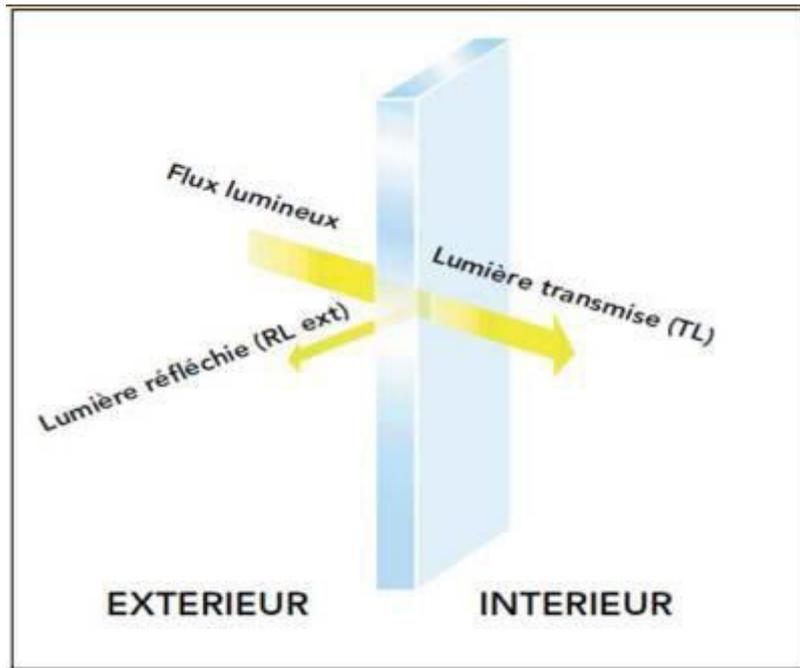


Figure I.8 : Transmission lumineuse du verre plat.

10.2. Les fibres de verre

Elles sont obtenues par étirage de verre fondu, jusqu'à ce qu'elles présentent 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.



Figure I.9 : Les fibres de verre

10.3. Les verres creux

Les verres creux sont utilisés pour fabriquer les bouteilles, les flacons, les tubes, les ampoules, les briques et les pavés. La composition du verre est différente suivant le produit fabriqué. Pour un contenant de produits alimentaires, on emploie un verre sodo-calcique. Une quantité déterminée du verre fondu est introduite dans un moule et pressée vers 400-450°C. Les moules sont en acier spéciaux 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.



Figure I.10 : Le verre creux

10.4. Le verre 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, en général composée d’oxydes métalliques. L’épaisseur de cette couche est de l’ordre de 10 nanomètres (soit un centième de micromètre) à 800 nanomètres ($0,8 \mu\text{m}$). Pour optimiser les performances, la couche peut être constituée d’un empilement de plusieurs sous couches.

Le rôle de cette couche est de modifier le comportement optique (exemples : les vitrages antireflets, les vitrages réfléchissants utilisés pour réduire le facteur solaire), chimique (exemples : les vitrages ‘autonettoyants’, vitres hydrophobes), électrique (dépôts conducteur électrique et transparent) ou encore mécanique (exemple : les traitements contre les rayures).



Figure I.11 : Le verre à couches.

▪ Nature de couches, procédés de dépôt

Il existe plusieurs techniques de formation de couches minces sur du verre :

- L'évaporation sous vide : la matière à déposer est chauffée sous vide, s'évapore puis se dépose sur la surface du verre.
- La pulvérisation cathodique : les atomes d'un gaz sont ionisés sous champ électrique élevé, sont accélérés et sont projetés sur une cible constituée du matériau à déposer. Les atomes éjectés de la cible se déposent sur le substrat en verre. Cette technique est nommée selon le sigle PVD (Physical Vapor Deposition). La température de la surface du verre n'est pas élevée.
- La projection de composés sur la surface chaude du verre : les composés se transforment en oxydes au contact de la surface chaude du verre : c'est la technique de dépôt chimique CVD (Chemical Vapor Deposition). - procédé 'sol-gel' : un composé organo-métallique est déposé sur le substrat immergé dans une solution ('dip coating'). Le composé est transformé en oxyde métallique par traitement à haute température.

Si le dépôt de la couche a lieu 'en ligne' à haute température l'adhérence et la durabilité sont assurées et il s'agit de 'couche dure' (typiquement la technique CVD).

La technique de dépôt à basse température (après élaboration du verre) produit des couches appelées 'couches tendres' (typiquement PVD).

Les performances optiques en termes d'émissivité des couches 'tendres' sont meilleures que celles des couches 'dures', mais leur durabilité mécanique et chimique est moindre. Par exemple, l'émissivité de couches dures est de l'ordre de 0,2 tandis que l'émissivité des couches 'tendres' peut être aussi basse que 0,04.

▪ Fonctionnement optique du verre à couches

La couche modifie le comportement optique du verre, dans le domaine visible et dans l'infrarouge. Dans le domaine architectural, il faut tenir compte de la répartition énergétique de l'énergie solaire arrivant sur terre.

La puissance du rayonnement solaire sur terre est constituée de 43 % de rayonnement infrarouges, de 3 % de rayonnement ultraviolet et le reste, 54 % étant la lumière visible.

Une application importante est apportée par une modification du comportement vis-à-vis du rayonnement solaire en contrôlant d'une part l'énergie solaire transmise et d'autre part la luminosité, conduisant ainsi à une économie de conditionnement d'air (en été) ou de chauffage (en hiver).



Figure I.12 : Fonctionnement optique du verre à couches

❖ Performances

La performance thermique d'un double vitrage incorporant un verre à couches tendres est nettement supérieure à celle d'un double vitrage classique.

Les avantages d'une telle isolation thermique sont nombreux :

1. Diminution sensible des dépenses de chauffage (électricité, gaz, bois...)
2. Amélioration du confort :
 - Quasi-suppression de la zone froide près des parois vitrées
 - Utilisation maximale de l'espace
 - Réduction des risques de condensation sur le verre intérieur
 - Un haut niveau de transmission lumineuse
 - Un faible niveau de transmission énergétique (facteur solaire faible).

10.5. Les verres transformés

10.5.1. Le verre trempé

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

La première consiste à chauffer le verre jusqu'à environ 600-650 °C avant de subir un refroidissement brutal par jets d'air. Le verre trempé ne peut plus se découper ou se façonner. Si le verre se brise pour une raison quelconque, il se fragmente en de multiples morceaux non coupant, dont la grandeur dépend de l'état de trempe. Ce qui permet de minimiser les risques de blessures profondes. On retrouve les principales applications de ce verre dans le bâtiment (portes, balustrades, allèges, cabine douche, ...). La trempe chimique obtient significativement les mêmes résultats, mais avec une

technique différente : le verre est placé dans un bain à 400°C composé de sels de potassium. Le remplacement des ions sodium du verre par les ions potassium du bain va créer la même compression du verre que par le procédé thermique.

Un verre trempé peut être 5 fois plus résistant qu'un verre ordinaire. La figure (Fig. I.13) met en relief l'aspect du verre trempé.



Figure I.13 : Verre trempé.

10.5.2. Le verre feuilleté

Il est composé de deux ou plusieurs feuilles de verre assemblées à l'aide d'un ou plusieurs films plastiques (le PVB : Poly Vinyl Butyral), résine ou gel. Après la mise en place des composants, l'adhérence parfaite est obtenue par traitement thermique s'il s'agit de film plastique (par autoclave). En présence de résine, la mise en place se fait par coulage de résine liquide entre les verres et à la faire durcir sous des lampes ultra-violet. Ce type de verre ne peut être ni coupé, ni scié, ni percé ou façonné.

Ces performances peuvent être la limitation des blessures en cas de bris, la protection contre l'effraction, protection contre les armes à feu, les explosions, les incendies, isolation acoustique, la décoration. Le nombre et l'épaisseur de chaque élément du vitrage feuilleté est normalisé avec la notation suivante : 44.2 par exemple signifie que le vitrage comporte deux couches de verre épaisses de 4 mm chacune ainsi que 2 intercalaires PVB que l'on peut apercevoir sur la figure (Fig.I.14). Le 33-1 comprend donc 2 feuilles de verre de 3mm d'épaisseur + 1 feuille de PVB (épaisseur de 0.38mm).

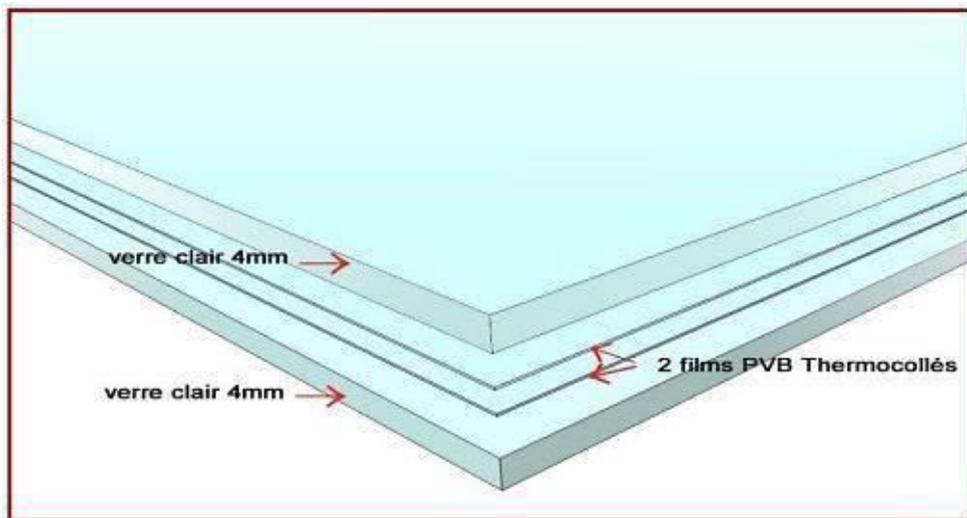


Figure I.14 : Illustration d'un verre feuilleté 44.2.

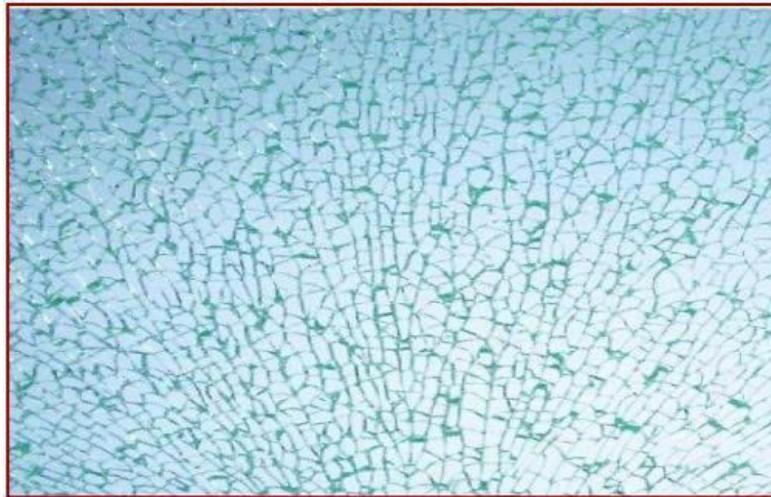


Figure I.15 : Verre feuilleté décoratif.

Le verre feuilleté Medilam est fabriqué à base de verres clairs MFG et conformes aux normes EN572-9 et EN 410 en vigueur en Europe, collés entre eux par un intercalaire PVB (Butyral Poly Vinyle).

Le Medilam résiste à l'impact, lors d'un choc avec un corps étranger, le verre se fendille, la fracture est localisée au point d'impact sans altérer la visibilité.

L'intercalaire PVB maintient les morceaux de verre en place, ce qui diminue le risque de coupure par l'éclat de verre. Il agit par ailleurs l'étanchéité de la proie. De plus l'énergie résiduelle du corps est absorbée par cet intercalaire lors du choc, le vitrage empêche donc le passage du corps si l'impact n'est pas disproportionné.

❖ Performance

Le Medilam vous assure une protection :

- Contre les blessures
- Contre la chute de personnes
- Contre la chute d'objets
- Contre le vandalisme et l'effraction
- Contre les rayons ultra-violet

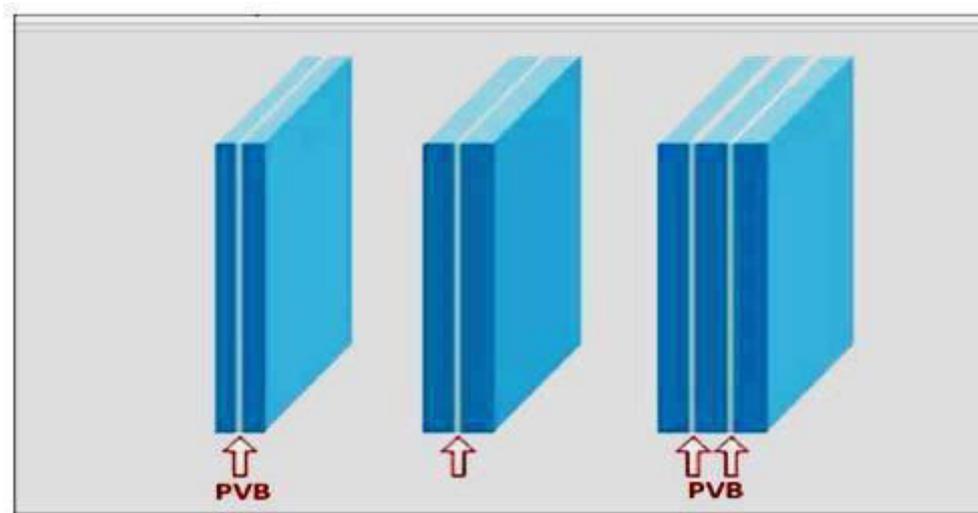


Figure I.16 : La performance de verre feuilleté Medilam

Conclusion

Dans ce chapitre, les généralités sur le verre ont été exposées, en partant de la définition et l'historique du verre jusqu'à ses applications industrielles. Bien évidemment, la structure et les différentes propriétés physiques et chimiques ont été évoquées. Un rappel a été donné sur les verres plats, les verres feuilletés, verre trempé et verres à couches. Il est à noter que nous avons trouvé deux verres qui se rassemblent visuellement et c'est cela qui nous a intéressé et qui nous a poussé à chercher et à comprendre leurs caractéristiques et la différence entre eux et tout cela sera présenté dans les chapitres suivants.

Chapitre II

*Procédés d'élaboration des
différents verres*

Chapitre II : Procédés d'élaboration des différents verres [8-12]

1. Verre plat « float »

Le float est une technologie inventée par **Sir Alastair Pilkington** en **1952**, et devenue très importante dans la fabrication du verre plat.

Ce procédé consiste à fabriquer un ruban de verre en fusion qui flotte dans un bain d'étain liquide. Pour éviter toute oxydation du bain, la production du verre se fait sous atmosphère contrôlée neutre ou légèrement réductrice.

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

Tout d'abord, les matières premières sont dosées et intégrées au four de fusion qui se fait à une température de près de 1550°C. Ensuite, elle s'abaisse à environ 1100°C à 1300°C. Le mélange atteint ensuite un bain métallique fondu sur lequel se forme la feuille de verre plane et d'épaisseur constante. La température à la sortie du bain est de 600°C, le verre maintenant va se refroidir progressivement dans l'étenderie, et être contrôlé jusqu'à 50°C. A la sortie de l'étenderie, le verre subit encore un contrôle automatique des défauts avant d'être découpé.

Actuellement le procédé float est le plus utilisé pour produire du verre plat de haute qualité au niveau mondial.

En général, les principales matières premières se classent en trois catégories :

- **Vitrifiants** : sont des éléments de bases qui créent la structure vitreuse.
- **Fondants** : sont des oxydes qui abaissent la température de fusion. Exemple (Na_2O , K_2O et Li_2O)
- **Stabilisants** : sont des oxydes qui donnent de la stabilité, la résistance et la durabilité au verre, Les principaux sont : CaO , MgO , ZnO , BaO , TiO_2 , PbO et Al_2O_3 .

1.1. Les caractéristiques du verre Float

Tableau II.1 : Caractéristiques du verre float

Dureté	Module de young (kg/mm^2)	Coefficient de poisson	Résistance à compression (kg/mm^2)	Dilatation linéaire (kg/mm^2)	Conductivité thermique (k^{-1})	Chaleur spécifique ($\text{W}/^\circ\text{C}$)	Indice de réfraction	Epaisseur (mm)	Couleur
Suivant l'échelle de Mohs est de 6.5	7.500	0.22	1 à 10 (varie selon l'état de surface)	100 à 150	$9 \cdot 10^{-6}$	1.06	1.52	2 à 19	Clair

1.2. Les étapes de fabrication du verre plat Float

1.2.1. La matière première utilisée pour la fabrication du verre

Les compositions verrières sont ajustées en fonction de l'usage auquel elles sont destinées. L'ingrédient de base est la silice, issue du sable, du quartz ou du feldspath. Les carbonates de soude, le calcaire et la dolomie et d'autres matières sont ajoutées pour obtenir les propriétés souhaitées du verre.

▪ Le sable

Le sable est une substance naturelle et la principale matière première 70% de la masse totale du verre. Intervenant dans la fabrication du verre. Car il constitue la plus importante source de SiO_2 (le sable de quartz qui est riche en SiO_2), ils apportent la silice qui a un rôle d'oxyde formateur de réseau (sa structure est à base de tétraèdre « SiO_4 »).

Les risques potentiels pour cette matière première sont en grande partie liés aux impuretés comme l'oxyde de fer (Fe_2O_3) dont sa teneur doit être régulière pour éviter l'altération de couleur et des minéraux lourds qui sont difficilement fusible et se manifestent dans le produit final sous forme d'inclusions solides.

Le point de fusion du sable est trop élevé. Pour que la fusion soit économique, il faut ajouter un fondant, tel que l'oxyde de sodium, pour réduire la température de fusion.



Figure II.1 : Stock de sable

▪ Carbonate de soude (Na_2CO_3)

C'est la source principale d'oxyde de sodium Na_2O qui est utilisé comme un oxyde modificateur qui dépolymérise le réseau des oxydes formateurs.

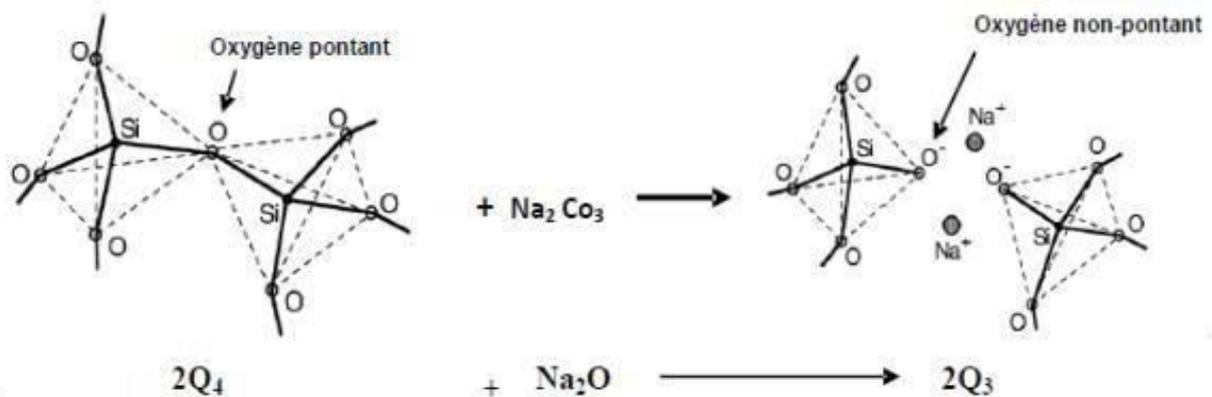


Figure II.2 : Rupture d'une liaison SiO par introduction d'une molécule Na_2O dans le réseau. L'introduction de Na_2O a deux effets :

D'abord, chaque molécule Na_2O provoque la coupure d'une chaîne —O—Si—O—Si—O— et la formation de deux groupements —O—Si—O . (les oxydes qui produisent cet effet : des modificateurs de réseau).

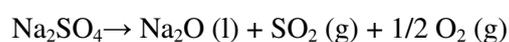
Ensuite, lorsqu'on ajoute du Na_2O à la silice la viscosité va se diminuer, la conductivité électrique et le coefficient de dilatation s'augmentent mais on note une baisse importante de la température de liquide. Cette dernière a un double intérêt pratique :

- La température de fusion est abaissée
- On peut refroidir la fonte jusqu'à ce qu'elle ait la viscosité convenable pour le formage (sans risque de cristallisation).

▪ Sulfate de soude (Na_2SO_4)

C'est un agent d'affinage est un courant de composé chimique constitué de deux ions de sodium et un seul ion de sulfate. Il prend l'aspect d'un solide cristallin blanc quand il se sèche, avec la formule chimique Na_2SO_4 , il est utilisé dans la fabrication des détergents.

L'ajout de sulfate de sodium permet l'élimination efficace des bulles encore piégées dans le liquide. Le sulfate de sodium se décompose en effet à partir de $1300\text{ }^\circ\text{C}$ pour former du SO_2 et de l' O_2 gazeux :

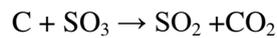


Chapitre II : Procédés d'élaboration des différents verres

Il a pour rôle de faire grossir les bulles existantes et de brasser le liquide, permettant ainsi son homogénéisation. Il s'agit de l'étape d'affinage.

▪ **Charbon**

Le charbon est une roche sédimentaire utilisé comme réducteur intervenant dans les phénomènes de fusion par réaction avec le sulfate de sodium



Et formée à partir de la dégradation partielle de la matière organique dans des plantes.

▪ **Oxyde de fer (Fe₂O₃)**

C'est un stabilisant et un colorant (couleur verte) souvent contenu dans les roches naturelles, il donne une teinte verdâtre au verre. Il procure des ions Fe²⁺ qui influence considérablement la conduction du rayonnement.

Il y a des circonstances où l'oxyde de fer donne au verre une teinte bleue, et dans l'autre donne une teinte jaune, dans ces deux cas le fer se trouve à des degrés différents d'oxydations.

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.

L'oxyde de fer est considéré aussi comme régulateur de la transmission lumineuse du verre.

▪ **Calcin**

Une matière première de plus en plus importante, c'est du verre de récupération qu'on emploie comme matière première.

L'utilisation du calcin ménager est pour deux raisons :

- D'une part, pour éviter la pollution et l'aspect recyclable.
- D'autre part, la fusion du calcin consomme moins d'énergie que le mélange vitrifiable.



Figure II.3 : Calcin récupéré et stocké

▪ Dolomie ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)

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

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

L'oxyde de magnésium (MgO) est mis essentiellement afin d'éviter la dévitrification. Cependant, le remplacement d'une partie de CaO par MgO entraîne aussi d'autres effets bénéfiques puisqu'une amélioration de la fusion jusqu'à un rapport MgO/CaO de l'ordre 1/3 est constatée au-delà de cette proportion l'effet contraire se produit.

Et aussi, le MgO est un meilleur stabilisant pour le verre que CaO . Le remplacement d'une partie du CaO par une même quantité de MgO améliore la résistance chimique du verre.



Figure II.4 : Stock de la dolomie

▪ Calcaire (CaCO_3)

Le calcaire, roche constituée de carbonate de calcium, riche en oxyde de calcium (CaO) (plis de 58%), permet d'ajuster la teneur en calcium du verre produit.

Leur emploi en verrerie permet d'ajouter de l'oxyde de magnésium (16 à 23%) à la composition vitrifiable. Selon leur teneur en magnésium, il peut s'agir de calcaire de magnésium (<5% MgO) ou de calcaire dolomitique (5% < MgO <10%).

Il permet d'améliorer la résistance chimique des verres sodiques en diminuant fortement leur solubilité, aussi il entraîne l'augmentation de la densité, du coefficient de dilatation thermique et de l'indice de réfraction. Cependant, il décroît la résistance mécanique.

La présence de CaO provoque la création de deux oxygènes non-pontant, qui conduit un abaissement de la viscosité.

▪ Feldspath [$(\text{K}, \text{Na}) \text{AlSi}_3\text{O}_8$]

Silicate hexa silicique d'aluminium, le feldspath est une matière première difficilement fusible. Ils jouent un rôle très important en tant que fondants dans la production du verre.

Ils améliorent la résistance chimique et augmentent la viscosité à basse température.

L'alumine (Al_2O_3) est un oxyde intermédiaire, il ne vitrifie pas seul, mais une fois il est combiné avec d'autres oxydes comme la silice (Aluminosilicates) il agit comme un formateur de verre.

Chapitre II : Procédés d'élaboration des différents verres

Lorsque Al_2O_3 est introduit dans un verre contenant des alcalins, il devient possible à Al^{3+} de se substituer à Si^{4+} dans le réseau si à son voisinage se trouve un Na^+ qui compose la charge négative excédentaire. Chaque Al_2O_3 introduit fait disparaître la paire d'oxygènes non-pontant.

Tableau II.2 : Consommation journalière et provenance des matières premières MFG

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

1.3. La ligne de production du verre

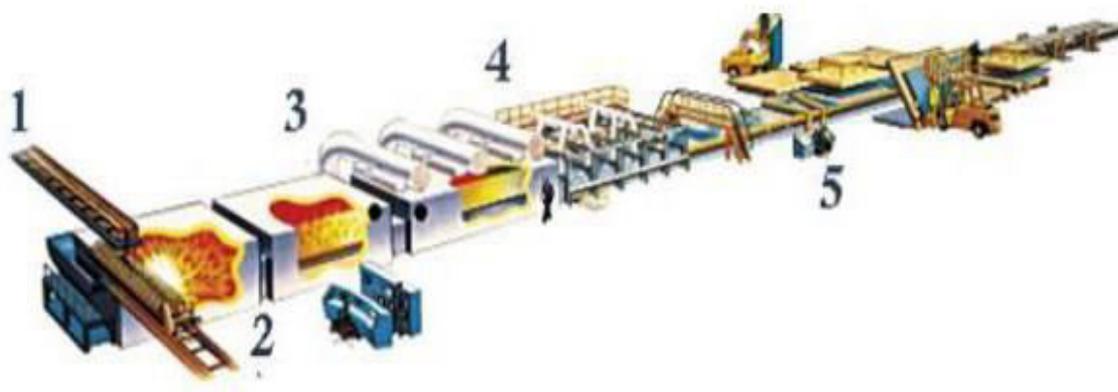


Figure II.5 : Schéma de la ligne MFG

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

1) Enfournement

Les matières premières, après stockage dans des silos emballés (de façon à ce qu'aucune pollution ou transformation ne soit possible), sont reprises et pesées pour former le mélange vitrifiable.

Après pesage, ces derniers (sans calcin) sont envoyés au mélangeur pour obtenir une masse homogène constituant le mélange vitrifiable. L'objectif de l'homogénéisation est de faciliter les réactions chimiques qui se produisent au niveau de la fusion, accélérant ainsi cette dernière et permettant d'obtenir un produit final homogène.

Le mélange s'effectue en deux temps, mélange de matière sèche et mélange de matière humide.

L'ajout du calcin se fait au niveau de la trémie d'enfournement pour être ensuite enfourné dans le four de fusion à l'aide des enfourneuses.

2) Le four de fusion (régénérateur)

Fabriqué en briques réfractaires, le four contient jusqu'à 2000 tonnes de verre fondu à 1550°C et la température est constamment contrôlée. La fusion du verre pour la ligne « float » sera assurée par un four régénératif à six brûleurs transversaux.

Le verre fondu est affiné et homogénéisé, est ensuite conditionné à température contrôlée avant d'arriver au bain d'étain, pour avoir un bon fonctionnement le four est équipé de dispositifs automatique de mesure d'enregistrement et régulation de pression et niveau de verre, d'un système de minuterie et d'inversion automatique de la flamme. Les fumées sont évacuées par tirage naturel par une cheminée de 82.5 mètres.

Le mélange de matières premières est envoyé au four de fusion où la température de la zone chaude atteint environ 1575 °C. Les matériaux solides introduits transforment en un liquide homogène le verre fondu après avoir passé à travers diverses transformations physico-chimiques. Le type de four employé à cet effet est un four avec 06 agents régénérant transversaux.

Par alternance, tous les brûleurs d'un même côté fonctionnent et les fumées s'échappent du côté opposé. Chaque vingt minute on inverse le sens. Le verre est alors refroidi à une température de 1100 °C (température de façonnage).

Quand le verre fondu sort du four, il est versé dans un bain en étain fondu. Le verre flottant sur une surface liquide plane, est étiré en un ruban à faces parallèles.

Chapitre II : Procédés d'élaboration des différents verres

Sur les bords du ruban, des roues dentées (top-Rolls) étirent ou repoussent le verre latéralement, pour avoir l'épaisseur désirée. Actuellement les épaisseurs possibles vont de 0,5 mm à 25 mm.



Figure II.6 : Four de fusion à MFG

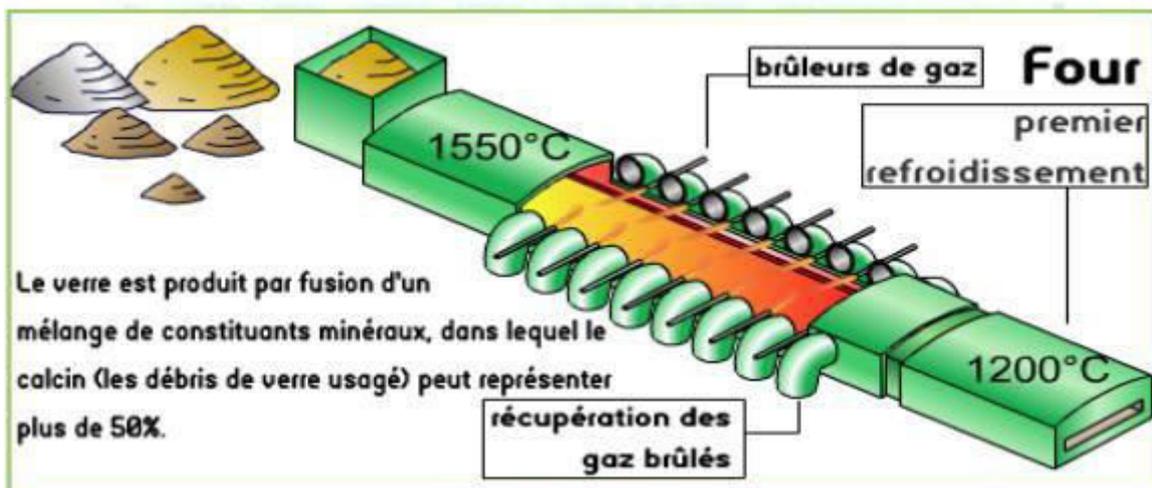


Figure II.7 : Vue d'en haut du four de fusion

Caractéristiques du four

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

3) Le bain d'étain

En effet, le bain est un système imperméable à l'eau à atmosphère contrôlée composé d'azote et d'hydrogène. Il est composé d'une structure en acier, une enveloppe métallique supérieure, une autre inférieure protégée de l'étain par des réfractaires spéciaux et de systèmes de contrôle de la température du ruban de verre et du formage. Le verre flotte sur un bain d'étain en fusion d'où le nom du procédé.

Les roues dentées (rouleaux supérieurs) situées sur les bords du ruban propulsent le verre vers l'avant et déterminent l'épaisseur requise par les mouvements suivants :

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

Ces rouleaux prennent la feuille de verre, à travers les deux bords, en utilisant des roues dentées, puis en l'étirant en longueur et en largeur. La vitesse d'écoulement du verre et les vitesses de rotation des TR contribuent à régler l'épaisseur du verre, en général entre 0.55 mm et 25 mm.

Au-dessous de 2mm, c'est le verre extra mince.



Figure II.8 : Le bain d'étain

Caractéristiques

- Longueur totale : 64 m
- Température du verre à l'entrée : $1100^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$
- Température du verre à la sortie : $600^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
- Quantité d'étain fondu : 200 tonnes.

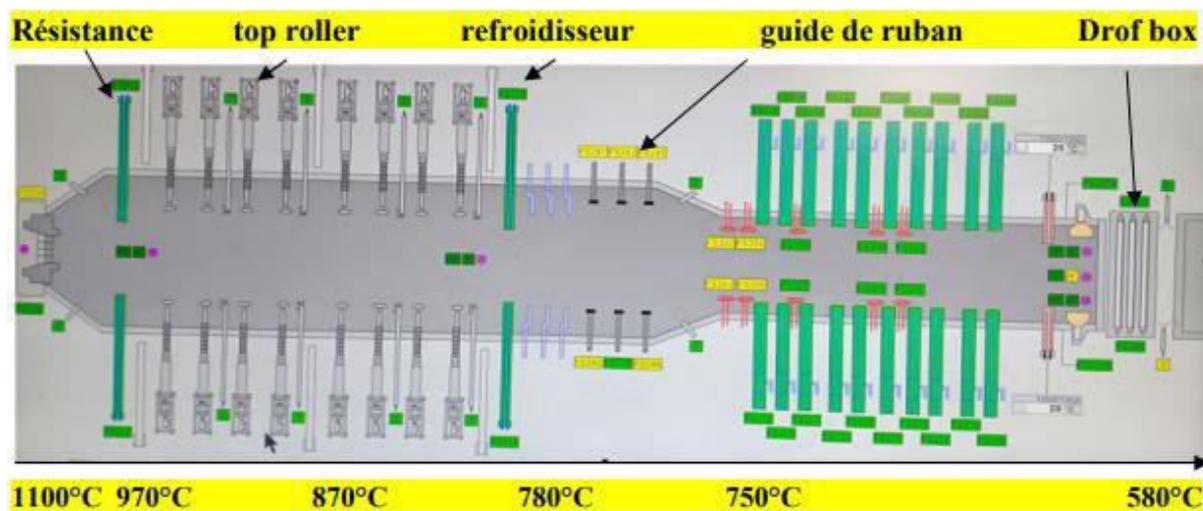
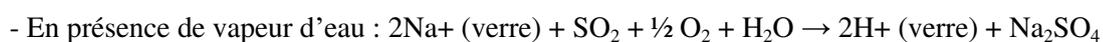


Figure II.9 : Section de bain d'étain

4) L'étenderie

Pour éviter la formation de défauts mécaniques dus aux contraintes subies par le verre pendant le refroidissement, le ruban du verre est soumis au processus de l'annealing. Il s'agit d'un traitement thermique effectué à l'intérieur d'un tunnel long d'environ 120 m. Le verre est introduit à 600°C d'une façon à ce qu'il refroidisse sous contrôle jusqu'à la température ambiante. (Des résistances de chauffage et des ventilateurs permettent un contrôle précis du profil de température dans le sens longitudinal et transversal du ruban).

Pendant la période de résidence du verre dans l'étenderie, pour en améliorer les caractéristiques, le SO_2 gazeux est introduit. Ce procédé provoque un échange ionique en sub-surface et conduit à la formation de sulfates de sodium, selon les réactions suivantes :



Chapitre II : Procédés d'élaboration des différents verres

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

Caractéristiques

- Longueur : 114,550 m.
- Largeur : 5,10 m.
- Largeur originale du verre : 4,30 m.
- Épaisseur du verre : 2 à 19 mm.
- Température : - Entrée : $600 \pm 20^{\circ}\text{C}$. – Sortie : $70\text{--}95^{\circ}\text{C}$.
- Vitesse de déplacement du verre : 80~1000 m/h

Après avoir refroidis le verre on le découpe avec un système de découpage et des normes à suivre.

L'étenderie se divise en plusieurs zones A, B, C, D, E et F dans chaque zone un traitement thermique spécifique est infligé au ruban de verre.

Tableau II.3 : Les zones de l'étenderie

Zones	Longueur (m)	Procédé thermique	T° du verre (°C)	Structure de la zone
A0	4,42		580	Partie couverte renforce et profilé
A	18	Convection : courant parallèle- air froid	550	
B1	12	Convection : courant parallèle- air chaud	520	
B2	15		480	
C	20,40	Convection : cote courant-air froid	380	
D1	10,80	Convection : forcé-air chaud	290	Partie couverte par tôles
D2	10,80	Convection : forcé-air chaud	200	
E	6	Naturelle		A l'air libre
F1	8,40	Convection : forcé-air froid	130	
F2	8,40	Convection : forcé-air froid	90	
F3	10,20	Convection : forcé-air froid	70	
TOTAL	119,02			

5) Système de découpe (Bou froid)

Le ruban du verre produit est refroidi à l'air libre, puis contrôlé de manière permanente (épaisseur, qualité optique, défauts, etc.), coupé en plateaux de superficie standard et « débordé » automatiquement (enlèvement des bords). Les plaques ainsi produites sont disposés verticalement sur des chevalets, grâce à des releveuses à ventouses.



Figure II.10 : Système de découpe

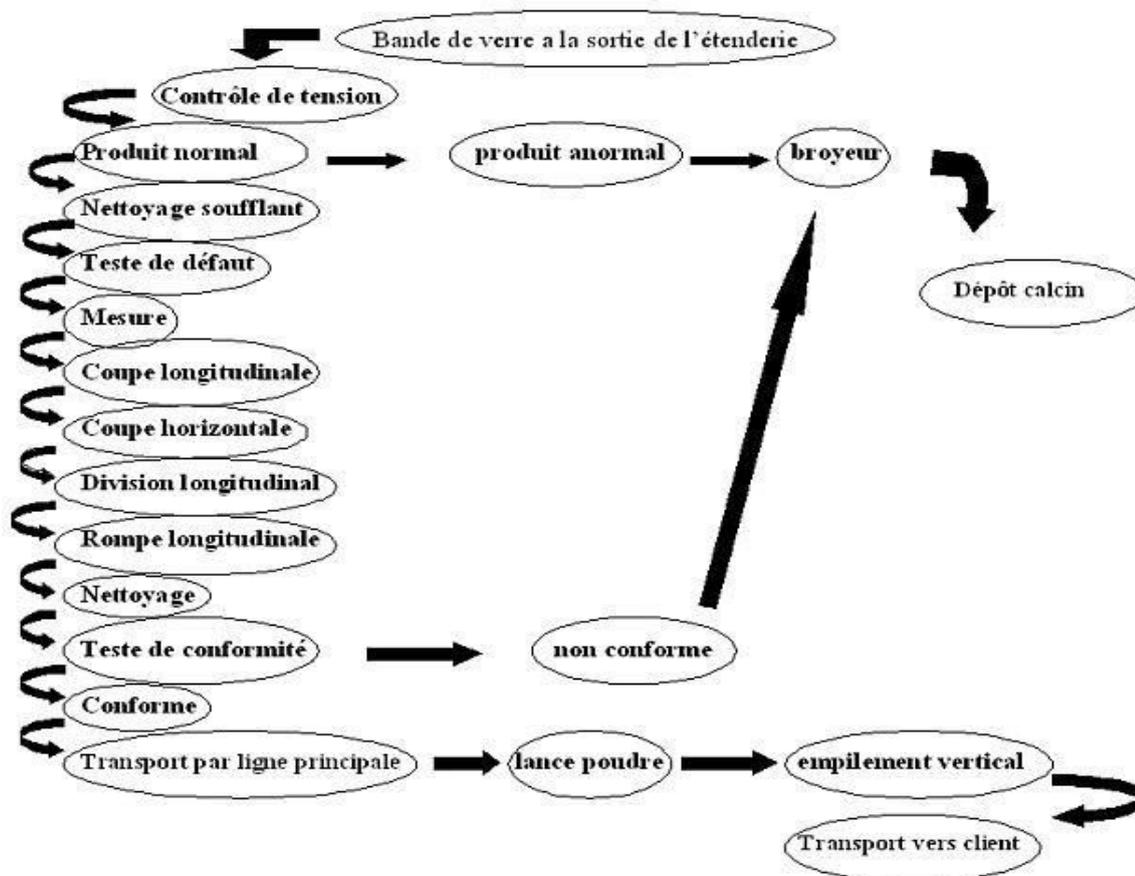


Figure II.11 : Technique du parcours du verre dans le bout-froid

2. Le verre feuilleté

2.1. Description du verre feuilleté

Le verre feuilleté ou laminé est un type de verre qui est composé de deux ou plusieurs couches de verres liées ensemble par une ou plusieurs couches d'un matériau de noyau mince (en plastique) nommé PVB (butyral de polyvinyle). Comme les plaques sont généralement minces et subissent de grands déplacements latéraux, la théorie conventionnelle des plaques minces ne peut pas être appliquée ; à la place, une théorie non linéaire des plaques doit être employée. De plus, la couche intermédiaire, bien que souple dans les propriétés du matériau, apporte un changement significatif dans le comportement global du composite.

Le nombre et l'épaisseur de chaque élément du vitrage feuilleté est normalisé avec la notation suivante : 44.2 et cela signifie que le vitrage comporte deux couches de verre épaisses de 4 mm pour chacune ainsi que 2 intercalaires PVB et 44.1 signifie qu'il y a une feuille de PVB entre deux couches de verre de 4 mm (l'épaisseur du PVB est 0.38 mm).

2.2. Les étapes de production du verre feuilleté

Les étapes du feuilletage sont les suivantes :

❖ Lavage du verre

Le lavage du verre se fait en injectant l'eau sur la surface inférieure et supérieure de la plaque, accompagnée d'un brossage tournant. La vitesse de la machine à laver est réglable et par conséquent la vitesse des convoyeurs en amont et en aval s'adaptera.

Pour l'élimination des traces de contamination du façonnage et découpage, il se fait à l'aide d'eau ionisée et puis séché soigneusement par l'air filtré.

❖ Assemblage

Se fait dans une chambre isolée (hors poussière avec une température fixe : 18-20° et un taux d'humidité stable : 30%). Cette opération se fait en automatique ou semi-automatique, les opérateurs superposent le verre et le PVB.

L'ébarbage du volume feuilleté est effectué avant l'entrée dans le four de préchauffage.

Les étapes d'assemblage sont comme suite :

- Equerrage des plateaux pour assurer une coïncidence des deux feuilles à assembler
- Transfert du plateau de verre vers le tapis d'assemblage par une releveuse.
- Découpe et étalement du PVB.

Chapitre II : Procédés d'élaboration des différents verres

- Superposition d'un autre plateau sur le précédent en suivant les mêmes étapes.
- Dégazage à froid par activation des deux cylindres presseurs, afin d'échapper l'air existant entre la PVB et le verre.
- Débondage longitudinal et transversal du PVB.
- Une fois l'assemblage terminé, la feuille passe à la phase de pré-laminage.

❖ Dégazage

C'est l'opération d'élimination d'air empoisonné entre le verre et le PVB dans un four à plusieurs étages, et de seller les bords de l'assemblage de manière à éviter les risques de pénétration d'air au cours de l'opération d'autoclavage.

Cette opération se fait par un double calandrage dans un four préchauffer à 60°.

❖ Autoclavage

C'est le collage définit du verre et du PVB

Elle se fait dans une enceinte appelée « l'autoclave » à une pression de 12 bars et une température de 135°C-145°C avec un temps de cycle qui se change selon la composition et le remplissage du vitrage.



Figure II.12 : autoclave

❖ Nettoyage et emballage

Il nécessite un deuxième ébarbage pour éliminer le PVB excédentaire. Le conditionnement est réalisé pour assurer une bonne protection, et un bon calage pour permettre le transport de ces feuillets.

❖ Contrôle

Ce contrôle qualité se fait sur des échantillons pour vérifier :

- Le taux d'humidité ;
- L'adhérence ;
- La résistance à l'impact.

3. Le verre trempé

3.1. Définition de la trempe

La trempe est un procédé qui consiste à chauffer le verre à 700 °C environ et à le refroidir rapidement pour augmenter sa résistance tant à l'impact qu'aux chocs thermiques. Il présente des caractéristiques fondamentalement différentes de celles des produits de base dont il est issu, Il est de deux à cinq fois plus résistant qu'un verre ordinaire, en cas de bris. Il se fragmente en petits morceaux non coupant ce qui limite les risques de coupure. Il peut être mis en œuvre sur tous types de structures en respectant les indications exigées et laisse libre cours à la créativité des architectes. Une fois le verre trempé, il ne peut plus être scié, coupé, percé ou façonné.

La résistance à la flexion du verre trempé étant supérieure à celle du verre recuit, l'épaisseur de verre trempé nécessaire sera, dans des conditions identiques de sollicitations, inférieure à celle à prévoir en cas de verre recuit.

Le tableau suivant donne les valeurs de la résistance à la flexion, du coefficient de sécurité et du taux de travail (c'est-à-dire le rapport des deux valeurs précédentes) pour le verre recuit et les différentes sortes de verre trempé.

Chapitre II : Procédés d'élaboration des différents verres

Tableau II.4 : Résistance à la flexion, coefficient de sécurité, taux de travail et coefficient d'épaisseur équivalent pour le verre trempé

Type de verre	Résistance à la flexion (N/mm ²)	Coefficient de sécurité	Taux de travail (N/mm ²)	Coefficient pour l'épaisseur équivalente
Verre recuit	41,2	2,5	16,50	
Verre trempé thermiquement	196,0	4,0	49,0	0,58
Verre trempé chimiquement (*)	353,0	5,0 ou 7,0 (**)	70,6 ou 50,4	0,48 ou 0,57

(*) pour information car pas d'application dans la construction.
(**) on prend la valeur 5 si les bords du verre sont non apparents, la valeur 7 s'ils sont apparents.

3.2. Test de fragmentation

Le verre trempé thermiquement est un verre de sécurité, il doit satisfaire certains critères de fragmentation dans le but d'offrir une protection en cas d'impact humain accidentel.

Le verre est soumis à une contrainte superficielle permanente en compression induite par un procédé de chauffage et de refroidissement contrôlé afin de lui conférer une résistance accrue aux contraintes mécaniques, thermiques et des caractéristiques de fragmentation prescrites. Nombre minimum de fragments à l'intérieur d'un carré de 50x50mm exigés pour un verre float trempé thermiquement (selon la norme EN 12150).

Le verre trempé est un verre dur et solide, en cas de bris, il a pour principal avantage de se fragmenter en petits morceaux, minimisant ainsi les risques de blessures.

Il présente une résistance aux contraintes d'origine thermique bien supérieure à celle d'un verre recuit

Il procure une résistance aux chocs et à la flexion 5 fois supérieure à celle d'un verre recuit de même épaisseur.

Le tableau II.5 spécifie le nombre minimum de morceaux exigés en cas de bris d'un verre trempé thermiquement de 1100 mm x 360 mm. De plus, la longueur du plus gros fragment ne peut dépasser 100 mm.

Chapitre II : Procédés d'élaboration des différents verres

Tableau II.5 : Nombres minimum de fragments exigés pour un float trempé thermiquement en cas de bris (selon le pr EN 12150).

Epaisseur (mm)	Nombre minimum de morceaux
3	15
4 à 12	40
15 à 19	30

4. Verre à couches

4.1. Définition d'une couche mince

Une couche mince est un matériau dont l'épaisseur est très petite devant les deux autres dimensions. Cette petite distance entre les deux surfaces limites de la matière cause une perturbation des propriétés physiques selon cette dimension.

Les couches minces jouent un rôle très important en nanotechnologie car leur intérêt provient des particularités physico chimiques acquises par le matériau selon cette direction.

Elles représentent un enjeu économique et ceci est dû à la simplicité relative des techniques de leur réalisation, et donc au faible coût de leur élaboration.

Il y a une grande variété des matériaux pour produire des couches minces. On donne comme exemple : les composés réfractaires (oxydes, nitrures, carbures, ...), les métaux, les alliages métalliques, les composés intermétallique et les polymères.

4.2. Définition d'un verre à couches

Un verre à couches est obtenu par dépôt d'une ou de plusieurs couches minces de matières inorganiques (le plus souvent sur une seule face du verre), afin d'en modifier les propriétés physiques (facteur solaire, coefficient de transmission thermique, couleur) et/ou optiques (transmission et réflexion lumineuses).

4.3. Structure d'un verre à couches

Dans le but de l'obtention de bonnes propriétés et une bonne durabilité, il est souvent indispensable de déposer :

- Une sous-couche assurant l'adhérence sur le verre.
- Une couche (mais plus généralement plusieurs couches) pour donner au verre les caractéristiques fonctionnelles recherchées.
- Optionnellement, une couche de protection chimique et mécanique (dans le cas de verres à faible émissivité).

4.4. Le rôle des couches

a. Le coefficient de transparence, ou de transmission lumineuse (TL ou T)

Ce coefficient de transparence caractérise le pourcentage de lumière visible (spectre de longueur d'onde entre 380 nm et 780 nm) passant à travers le verre.

Il est évident que le coefficient T se situe entre 0 (opacité complète) et 1 (transparence totale).

b. Le facteur solaire (FS ou g)

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

c. Le facteur gain solaire

C'est le rapport T/g. Il définit la quantité de lumière visible transmise par un vitrage sans amener de chauffage supplémentaire. Le choix de ce facteur est important en fonction si le climat est froid ou chaud.

d. L'émissivité « e »

La chaleur est transmise par conduction, convection et radiation. Un simple vitrage perd une grande partie de ses caractéristiques d'isolation en raison de son rayonnement à haute énergie. Cette aptitude à rayonner la chaleur est caractérisée par l'émissivité e.

L'émissivité la plus élevée est celle d'un « corps noir » pour lequel il équivaut à 1, tandis que celle de l'argent métallique poli est de 0,02. Et celle du verre simple est de 0,87 à 0,89. Un vitrage revêtu d'une couche métallique mince pour rester transparente à la lumière visible peut être réduite jusqu'à 0,04.

e. Le coefficient de transfert thermique U

Le coefficient U est la mesure de la perte (ou du gain) de chaleur par une vitre causée par une différence de température de l'air entre l'extérieur et l'intérieur. La valeur de ce coefficient est le résultat de la nature des couches déposées sur les feuilles de verre et de la structure du vitrage.

Le coefficient U s'exprime en $W/m^2 \cdot K$ (watts par m^2 et par degré). Celui d'un vitrage simple est de l'ordre de $6 W/m^2 \cdot K$, 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 (Ar) ou encore mieux le xénon (Xe).

La résistance thermique est l'inverse de U $R = 1/U$.

Il n'est pas toujours possible de sélectionner séparément les coefficients TL, U, g et e. Un compromis est souvent à trouver. Par exemple, dans un pays froid, il est préférable d'avoir un haut g contrôle solaire pour profiter du chauffage par rayonnement solaire au cours de la journée.

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

4.5. Les fonctions d'un verre à couches

a) Les fonctions optiques

La couche change le comportement optique du verre dans le domaine visible et/ou l'infrarouge.

Les applications optiques du verre à couches concernent d'une part les vitrages utilisés dans le domaine de l'architecture et d'autre part, le traitement du coefficient de réflexion.

b) Les fonctions chimiques

C'est la création des vitres à propriétés hydrophobes ou au contraire hydrophiles. Par exemple les verres à couches autonettoyantes à base d'oxyde de titane.

c) Les fonctions électriques

Il s'agit d'obtenir un dépôt transparent à la lumière visible mais conducteur de l'électricité. Les applications sont l'élimination des charges électrostatiques, mais surtout la réalisation des vitrages électrochromiques « intelligents ». Certains vitrages de dégivrage utilisent une couche mince, transparente mais électriquement conductrice.

d) Les fonctions multiples

Souvent, on recherche la combinaison de ces diverses propriétés. Un exemple est le double vitrage autonettoyant et l'isolation thermique renforcée.

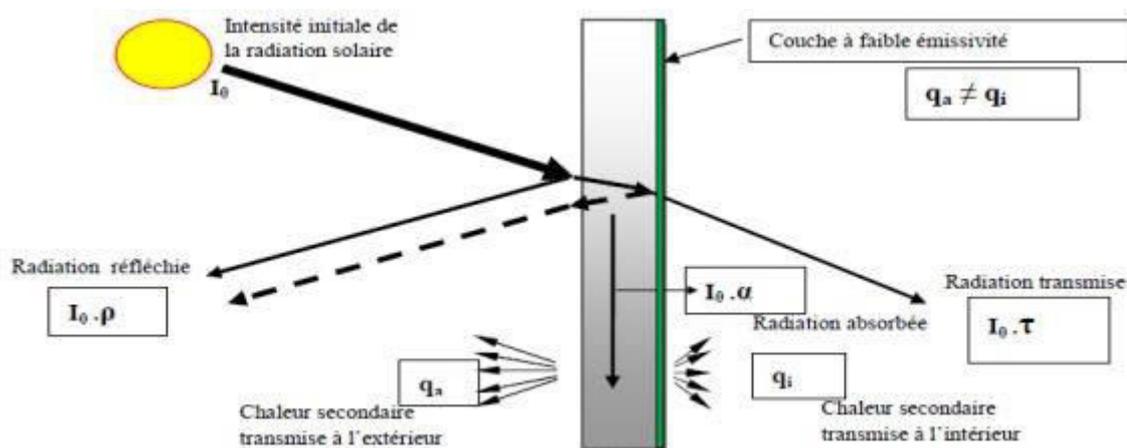


Figure II.13 : Interaction de la radiation solaire avec un verre à couches.

Tel que :

α = absorbance

ρ = réflectivité

τ = coefficient de transmission

Chapitre II : Procédés d'élaboration des différents verres

Tel que $\alpha + \rho + \tau = 1$

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 ($I_{0\rho}$), une autre est transmise à l'intérieur ($I_{0\tau}$) et une troisième est absorbée par le verre ($I_{0\alpha}$). La radiation solaire absorbée se dissipe également sous forme de chaleur vers l'intérieur (q_a) et l'extérieur (q_i) de la vitre.

En effet, le dépôt de couches métalliques ou d'oxyde de métal sur la surface du verre peut réduire le transfert de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur de la vitre.

4.6. Techniques de dépôt des couches minces

On peut distinguer deux grandes familles de méthodes :

Celles qui font appel à un gaz porteur pour déplacer le matériau à déposer d'un récipient au substrat et qui s'apparentent aux techniques de diffusion utilisées dans la fabrication des composants actifs, et ceux impliquant un environnement à très basse pression dans lequel le matériau à déposer sera acheminé au moyen d'une impulsion thermique ou mécanique initiale.

Le schéma suivant présente la classification de ces méthodes :

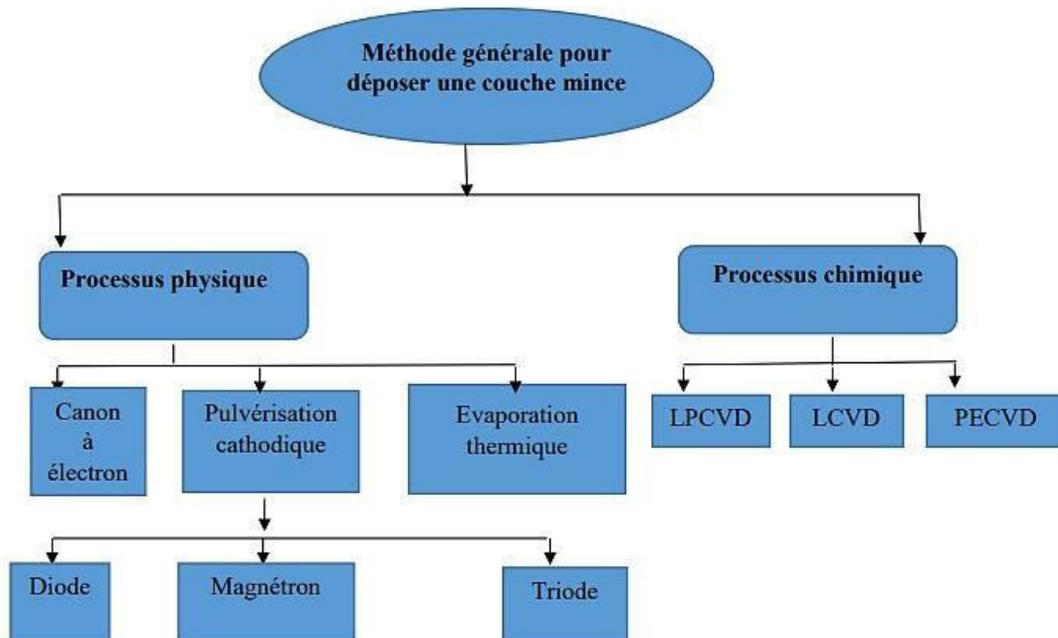


Figure II.14 : Les différentes méthodes d'élaboration

4.6.1. La différence entre les deux méthodes d'élaboration de la couche mince

Le tableau suivant indique les différences :

Chapitre II : Procédés d'élaboration des différents verres

Tableau II.6 : Comparaison entre les techniques CVD et PVD.

Techniques	Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - CVD - LPCVD - LCVD - PECVD 	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse de dépôt élevée - Amélioration de la qualité de couches - Possibilité de formation de composés 	<ul style="list-style-type: none"> - Dépôt en vue directe de la source : effets d'ombrage. - Dépôts de qualité aléatoire (structure colonnaire,...)
<ul style="list-style-type: none"> - PVD - 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 - Dépôts non uniformes - Investissement élevé - Cibles sensibles à la fissuration - réaction possible de la cible avec l'atmosphère gazeuse

4.6.2. Principales étapes du processus de fabrication

MFG s'est spécialisée dans la production des verres à couches à faible émissivité thermique, et pour cela elle a adopté la technique PVD (physical vapor deposition)

Le tableau suivant présente les types de verres à couches produit par MFG ainsi que les métaux déposés et leurs épaisseurs.

Tableau II.7 : Types de verres à couche produit par MFG ainsi que les métaux déposés et leurs épaisseurs.

Star S		Star S plus		Reflet	
Métaux	Épaisseur (nm)	Métaux	Épaisseur (nm)	Métaux	Épaisseur (nm)
Ti	11,1	Ti	10	Ti	37
TiOx	7	TiOx	7,5	-	-
ZnAl	5	ZnAl	4	-	-
NiCr	2,2	-	-	-	-
Sn	20,9	Sn	40,7	-	-
ZnSn	5	ZnSn	5,8	-	-
Ag	17	Ag	19,2	-	-

4.7. 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 (Coater) de plaque supports spécifique vient insérer des vitres de petit format sur la ligne de transport.

4.8. 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 approprié.

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 laver.

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

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

4.9. Dépôt des couches

a. Aperçu du système

Le dispositif de revêtement par pulvérisation, est conçu pour le dépôt automatisé de couches faible émissivité (Low-E), contrôle solaire et d'autres revêtements sur du verre plat architectural suivant un procédé de dépôt sous vide.

Les panneaux de verre (vitres) passent horizontalement sur un transporteur à rouleaux pour entrer, traverser et sortir du dispositif de revêtement. Le système fonctionne par chargement / déchargement discontinu associé à un processus de traitement continu.

Un schéma est représenté sur la figure suivante :

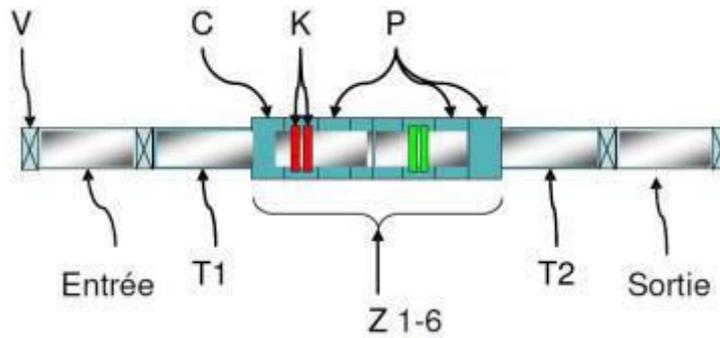


Figure II.15 : Aperçu du système de dépôt des couches.

Tel que :

V : vanne d'acheminement de verre ;

T1 : Chambre de transfert ;

Z1-6 : Zone de pulvérisation ;

C : Module de processus 1-6

K : Cathode de pulvérisation ;

P : Pompe intermédiaire pour l'évacuation du joint ;

T2 : Second section de transfert.

Avant le passage des vitres dans le processus de revêtement, les vitres sont transportées et acheminées vers la machine à laver pour les rincer, en suite les déshumidifier dans une enceinte fermée et protégée de milieu extérieur. Les vitres défectueuses sont retirées de la ligne par un convoyeur à rouleaux libres.

Les vitres sont acheminées ensuite dans la chambre à vide « Entrée » via une vanne V. Une fois le verre inséré, la vanne d'entrée V se ferme. Après avoir abaissé cette chambre d'entrée à une pression inférieure à 2×10^{-2} (mbar) au moyen de plusieurs étages de pompage, la vanne située entre la chambre d'entrée et la chambre de transfert s'ouvre pour permettre à la vitre d'entrer dans la chambre de transfert T1.

La vitre sera accélérée à la vitesse de transport afin de rattraper la vitre précédente tout en gardant une distance de sécurité d'environ 100 mm. Puis, elle sera ralentie à la vitesse de pulvérisation présélectionnée. Cette phase de rattrapage et jonction se déroule dans la section de transfert T1. Une série de vitres entre et défile ainsi à vitesse (de pulvérisation) constante dans la zone de process, ou pulvérisation Z. La chambre de transfert T1 est pompée par un nombre suffisant de pompes turbo

Chapitre II : Procédés d'élaboration des différents verres

moléculaires (PTM) pour atteindre un vide poussé. T1 se divise en trois sections, chacune d'entre elles étant pompée par différentes PTM. Les étages adjacents sont interconnectés par des fentes qui servent de barrières d'écoulement de gaz permettant un pompage différentiel le long de la chambre de transfert T1. A son extrémité aval, la pression est appropriée aux processus de pulvérisation se déroulant dans la section de process Z. La chambre de process Z est subdivisée en un certain nombre de compartiments de process C. Dans ces compartiments sont placés des outils de process, principalement des cathodes de pulvérisation K, 4 planaires et 14 rotatives. En passant par une série de cathodes de pulvérisation, les vitres sont consécutivement revêtues d'une série de couches sur leur surface supérieure. A sa sortie de la zone de process Z, la vitre a été recouverte d'une pile de couches minces.

Après leur passage par la chambre de process, les vitres entrent dans une deuxième section de transfert T2, où elles sont accélérées à la vitesse de transport et acheminées dans la chambre de sortie dédiée au déchargement. Les zones T2 et Sortie fonctionnent de manière exactement inverse à la section de chargement à l'entrée.

Le temps nécessaire pour faire passer une vitre de la pression atmosphérique au vide poussé est par conséquent appelé « temps de cycle mécanique ». Le temps de cycle mécanique définit la vitesse de production maximum en termes de vitres par heure. En conjonction avec la zone du transporteur du sas de chargement, il est possible de déduire la productivité maximum du dispositif de revêtement.

Le deuxième facteur déterminant la productivité est la vitesse de revêtement dans la zone de process. Par conséquent, pour une pile de couches donnée, celle-ci est déterminée par les vitesses de dépôt des cathodes de pulvérisation et le nombre de cathodes utilisées.



Figure II.16 : Zone de la partie de pulvérisation cathodique.

Remarque :



Cette image indique que la ligne est interdite pour les gens qui ont des maladies cardiaques car elle provoque de grands problèmes pour ces gens.

4.10. Principes fondamentaux du processus

4.10.1. Pulvérisation cathodique

La pulvérisation cathodique est une technique permettant de créer de fines couches. Le matériau de revêtement est retiré d'une cible par bombardement d'ions. Le matériau retiré est déposé sur un substrat.

❖ Plasma

Un plasma est requis pour conduire le processus de pulvérisation. Un plasma est un gaz Ionisé. Il peut être généré en exposant le gaz à une pression réduite dans un champ électrique statique ou dans un champ alternatif haute fréquence.

❖ Pulvérisation

Après l'ignition du plasma, de nombreux ions argon plasma viennent cogner la cible. En raison de leur large masse, ils présentent une impulsion très élevée. Cette impulsion transfère les atomes sur la surface de la cible, les éjectant un à un ou par agrégats d'atomes. Lors de l'impact, de la chaleur est générée, augmentant ainsi la température de la cible. Pour cette raison, la cible est refroidie à l'eau. Les atomes expulsés de la cible se déplacent librement dans la chambre de processus ; certains sont déposés sur le substrat. Cela s'appelle la « pulvérisation ».

La figure suivante présente le principe de la pulvérisation cathodique :

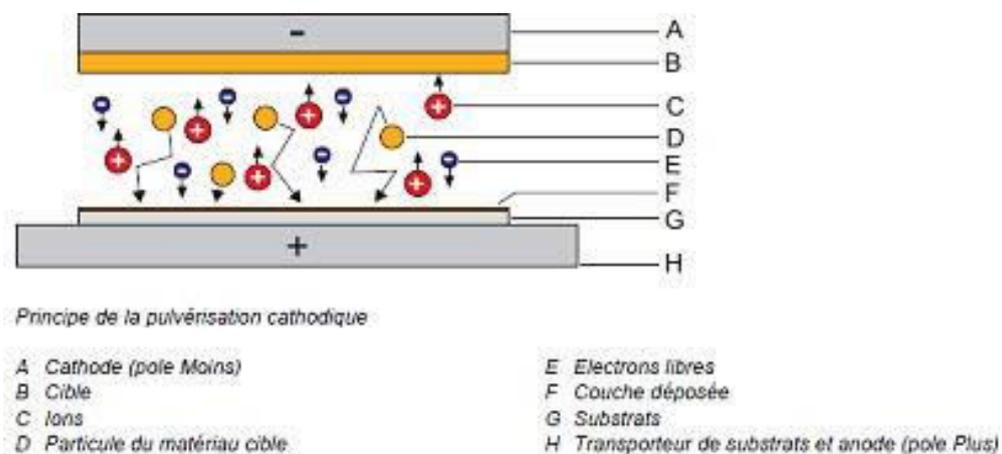


Figure II.17 : Principe de la pulvérisation cathodique

❖ Technologie à magnétron

Les aimants dans la cathode assistent le processus de décharge des électrons directement devant la cathode. Le champ magnétique oblige les électrons libres à effectuer des mouvements circulaires additionnels de manière à ce qu'ils se déplacent tous dans des chemins hélicoïdaux (comme des vis). Cela allonge le chemin des électrons. Un niveau plus élevé de dissociation du gaz de processus est généré et l'homogénéité du plasma augmente. Le champ magnétique accentue la projection des ions. Finalement, un profil d'érosion (creux d'érosion) se forme augmentant ainsi la température sur la cible. Les canaux d'eau de refroidissement en circulation protègent la cathode et son environnement contre toute surchauffe.

- Il génère un plasma stable et homogène ;
- Il utilise la cible à bon escient ;
- Il réduit le recouvrement de la cible avec les particules (le recouvrement de la cible peut entraîner des arcs électriques).

4.10.2. Pulvérisation réactive

Les techniques de pulvérisation utilisent un « gaz de travail » inerte chimiquement ne réagissant pas avec les atomes de la cible. L'argon inerte est un gaz de travail type. La composition chimique de la couche déposée est identique à celle du matériau cible. Dans le cas de la pulvérisation réactive, un « gaz de réaction », tel que l'oxygène ou l'azote, est mélangé au gaz de travail chimiquement inerte. De cette manière, des liaisons chimiques entre le matériau cible et le gaz de réaction peuvent être déposées sur le substrat. Les applications type incluent les dépôts d'oxyde et de nitrure lors de l'utilisation d'un métal comestible et d'oxygène ou d'azote comme gaz de réaction.

4.10.3. Système de vide

Le processus de revêtement nécessite un vide poussé environ 10^{-6} mbar, Le système de vide réalise les tâches suivantes :

- Evacuation des chambres de vide jusqu'à ce que la pression de processus soit atteinte.
- Le temps d'évacuation dépend du volume de la chambre et de l'état de la chambre (système propre et sec).
- Contrôle et entretien du vide lors de la phase de revêtement des pompes primaires mécaniques sont utilisées pour générer le pré vide dans toutes les chambres. Par ailleurs, ces pompes servent de pompes primaires pour les pompes turbo-moléculaires,
- La création du vide est basée sur des valeurs de pression prédéfinies et est entièrement commandée par le système de commande. Pour des raisons de sécurité, toutes les fonctions sont verrouillées par des commutateurs de fin de course, des moniteurs de flux et les valeurs de température. Lorsque la pression augmente de manière incontrôlée, les pompes de vides ont coupé en toute sécurité par une séquence programmée.

4.11. Le verre de pulvérisation pyrolytique

La technologie de production de verre enduit inclut deux méthodes de dépôt de revêtement : hors ligne en ligne et. La première se compose d'évaporation sous vide, de cathode en pulvérisation magnéton sous vide et de revêtement à trempette de sol-gel. La deuxième comprend principalement le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) et la pulvérisation en poudre à solide. Ce processus a deux verres typiques : le verre Co-Fe-Cr-O et le verre Ti-O.

Le premier type est fabriqué en déposant une couche optique très mince sur le verre flotté pendant la fabrication du verre. Le revêtement est un mélange composé de trois oxydes métalliques spécialement choisis afin de former une structure spinelle qui offre un niveau élevé de durabilité chimique. Ces trois métaux sont du Cobalt, du Chrome et du Fer et le mélange porte souvent le nom de Co-Fe-Cr-O. Ce verre réfléchit jusqu'à 30% - 40% des rayons infrarouges du soleil, environ 35% de la lumière visible incidente et absorbe les rayons Ultra-Violets jusqu'à 80%.

Chapitre II : Procédés d'élaboration des différents verres

Et le second type a le même procédé de fabrication utilisé pour faire du verre Co-Fe-Cr-O mais avec une composition de revêtement différente –TiO₂- résultant en esthétique de revêtement différent.

La plus grande différence est que la couche de verre TiO₂ n'absorbe pas la lumière visible, elle la reflète seulement. L'épaisseur de la couche de verre Ti-O est optimisée pour refléter approximativement 29% de la lumière incidente et visible de la surface recouverte, sans pour autant contribuer une importante quantité de couleur. Cela signifie que la couleur réfléchie du verre Ti O est neutre ou argentée. Et le verre Co-Fe-Cr-O a une couleur ambrée réfléchie et contribue à un élément transmis brun ambré foncé sur le verre.

Conclusion

Les différents procédés d'élaboration du verre ont été développés dans ce chapitre, particulièrement les procédés concernant le verre plat, feuilleté et à couches. Ainsi les étapes de sa fabrication, à savoir, la fusion, l'affinage, le façonnage et le recuit ont été présentées.

Les nouveaux procédés technologiques utilisés dans la fabrication du verre au sein de l'entreprise MFG ont été exposés, entre autres, CVD, PVD, LPCVD, LCVD, PECVD.

Chapitre III
Matériels et Méthodes

Les analyses effectuées au niveau de laboratoire [13-17]

1. Verre clair

1.1. Analyse granulométrique

C'est une opération qui consiste à diviser et à séparer un matériau en plusieurs classes granulaires de dimensions décroissantes au moyen d'une série de tamis. Dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas, et notre matériau se place dans la partie supérieure des tamis et le classement se fait par vibration de la colonne de tamis.

Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des filets.

Remarquez qu'il est nécessaire d'éviter la confusion entre la taille du grain, qui concerne la détermination de la taille du grain, et celle qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.



Figure III.1 : Préparation des échantillons du sable.

Matériel et produits utilisés :

- Un échantillon du sable
- Une balance
- Four à moufle
- Des tamis d'analyse à vibration

Mode opératoire :

- Nettoyer les tamis à sec et le fond de tamis en utilisant un pinceau, puis les peser à vide et noter les masses.
- Peser l'échantillon sec d'analysât (séché à l'étuve à $110 \pm 5^\circ\text{C}$ durant 01 heures, refroidi à température ambiante $10 \text{ min} \pm 05 \text{ min}$, puis divisé à travers un diviseur d'échantillons).
- Tamiser sur un tamiseur d'analyse à vibration comporte une série de tamis déjà pesés à vide allant de 2, 1.18, 0.85, 0.5, 0.425 et 0.2 mm pendant 10min.
- Refaire la pesée des tamis.



Figure III.2 : L'analyse granulométrique.

Objectif

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains.

On appelle :

- Refus sur un tamis : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.
- Tamisât (ou passant) : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

Expression des résultats

On doit faire la différence entre la pesée finale et initiale afin d'exprimer le refus individuel de chaque tamis dans cette analyse

1.2. Détermination du taux d'humidité

Matériels et produits utilisés :

- Mélange vitrifiable
- Un four
- Une balance

Mode opératoire :

- Peser 20g du mélange vitrifiable dans un verre de montre soit P1.
- Placer le verre dans le four à une température de 100°C à 110°C pendant 1h au minimum.
- Retirer l'échantillon du four et laisser à refroidir ensuite repeser soit P2.



Figure III.3 : L'appareil de mesure du taux d'humidité.

Expression des résultats

Les résultats s'expriment selon la relation suivante :

$$\%H_2O = \left(\frac{P_1 - P_2}{P_1} \right) 100$$

1.3. Fluorescence des rayons X

En fluorescence X, l'irradiation par un faisceau de rayons X primaire depuis un tube à rayons X provoque l'émission de rayons X fluorescents dotés d'énergies discrètes caractéristiques des éléments présents dans l'échantillon ; on peut en déduire la composition élémentaire, c'est-à-dire les concentrations massiques en éléments.



Figure III.4 : Spectromètre d'analyse de fluorescence de rayon X à MFG



Figure III.5 : les produits utilisés pour la préparation de la perle

1.4. Densité

Cela dépend des composants ; c'est à peu près $2,5 \text{ g/cm}^3$. Autrement dit, un mètre cube pèse environ deux tonnes et demie ou une feuille d'un mètre carré et d'un millimètre d'épaisseur pèse $2,5 \text{ kg}$.

En premier lieu, l'échantillon est introduit à température ambiante, puis la masse de l'échantillon est pesée dans l'air, qui ne doit pas dépasser 200g . Après avoir mesuré la masse de l'échantillon dans l'eau, l'appareil nous donne directement la valeur de la densité, nous avons utilisé l'échantillon de SPA pour la mesure.

La mesure de la densité a pour but de déterminer l'orientation de production du Float.

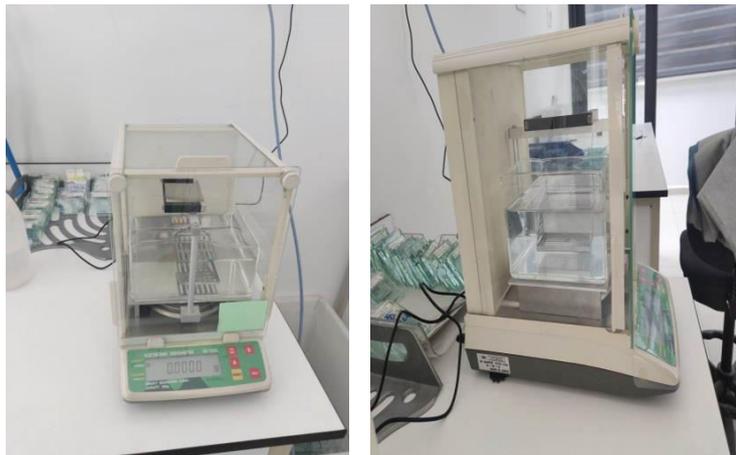


Figure III.6 : Appareil de mesure de la densité.

1.5. Microscope optique

Comme un appareil photo, le microscope optique utilise un objectif fait de plusieurs lentilles et un oculaire. Il agrandit plus ou moins l'image tout en séparant les détails à observer à l'œil nu. Il existe aujourd'hui plus d'une dizaine de types de microscopes optiques dont les meilleurs ont un grossissement $\times 2000$, qui permet d'examiner des objets ou des éléments invisibles ou difficilement visibles à l'œil nu (Inclusions, bulles, bavures, tâches), grâce à une lentille.

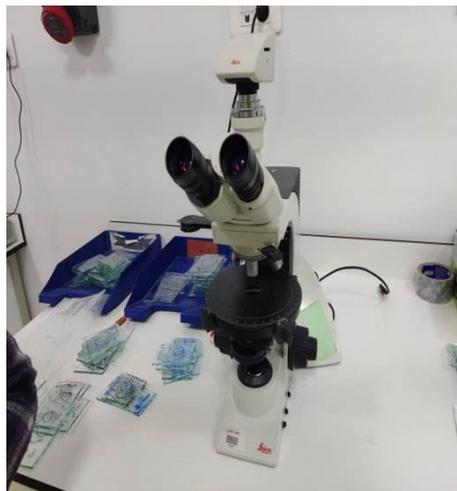


Figure III.7 : Contrôle par Microscope optique

1.6. Les contrôles optiques visuels

Dans le passage des produits verriers dans l'arche de recuit, les ouvriers font voir les défauts d'aspects présentés dans les produits en verre et travaillent pour éliminer le maximum de ces défauts. Les produits déformés sont récupérés et les produits distincts sont transférés aux autres contrôles afin de garantir un bon objet versé aux clients.

Défauts critiques

a. Défauts majeurs

Un défaut majeur est un défaut qui risque de provoquer une défaillance ou de réduire de façon importante la possibilité d'utilisation de l'individu pour le but qui lui est assigné.

Défaut qui interfère avec l'utilisation appropriée de l'article chez le client embouteilleur (lorsque le % de défaut dépasse une valeur généralement faible, de l'ordre d'un pour mille).

Exemples :

- Fond retombé
- Glaçures
- Col de travers
- Absence de gravure –
- Sale
- Bague non finie, etc...

b. Défauts mineurs

Un défaut mineur est un défaut qui n'est pas susceptible de réduire beaucoup et ne prévient pas une bonne utilisation, mais dont la présence est préjudiciable à l'aspect visuel, étant entendu cependant qu'un des défauts ci-dessous doit être considéré comme un défaut majeur si celui-ci est très prononcé.

Exemples :

- Grain < 2mm
- Bouillon < 3mm
- Peau de crapaud
- Martelage
- Fond craquelé, etc....

2. Verre feuilleté

2.1. Test d'ébullition

Le test d'ébullition visant à déterminer l'effet d'une exposition du verre feuilleté à des températures élevées dans l'eau bouillante.

Matériel et produits utilisés :

- Bain thermostatique (température 100°C) (ou une plaque chauffante et un récipient en pyrex ou en acier inoxydable).
- Gants résistants à la chaleur.



Figure III.8 : Bain thermostatique

Mode opératoire :

- Mettre suffisamment d'eau dans l'équipement.
- Régler le thermostat à 60°C.
- Mettre les échantillons dans de l'eau bouillante pendant 10 min à 60°C, pour éviter les risques de casse.
- Régler le thermostat à 100°C et laisser les échantillons pendant 02 heures.
- Après 02 heures de temps, les échantillons sont retirés puis refroidis, ils seront examinés afin de détecter d'éventuels bulles ou défauts puis seront laissés à température ambiante jusqu'au lendemain.

Expression des résultats

- Noter pour chaque échantillon, le nombre et l'étendue des défauts apparaissant dans l'intercalaire (bulles, délamination, opacification).

- Ecarter tous échantillon présentant des fissures et soumettre un autre échantillon.

2.2. Test à haute température (étuvage)

Le test visant à déterminer si le verre feuilleté résistera à des températures élevées pendant une période prolongée.



Figure III.9 : Appareil d'étuvage

Mode opératoire :

1. Placer les échantillons verticalement dans l'enceinte.
2. Régler la température à 100°C et commencer à chronométrer les 16 heures après 30 min du démarrage.
3. Après 16 heures, retirer les échantillons de l'enceinte.
4. Examiner les échantillons à une distance comprise entre 300 mm et 500 mm face à un fond blanc diffus entourer au marqueur les défauts et enregistrer le nombre.
5. Dans le cas où il n'y a pas de défauts selon les critères d'acceptation, remettre les échantillons dans l'enceinte et augmenter la température de 10°C pendant une heure.
6. Enlever les échantillons et les examiner attentivement
7. Répéter les étapes 5 et 6 jusqu'à ce que les échantillons échouent ou si la température 130°C est atteinte.

Expression des résultats

Noter pour chaque échantillon, le nombre et l'étendue des défauts apparaissant dans l'intercalaire (bulles, délamination, opacification).

Ecarter tout échantillon présentant des fissures et soumettre un autre échantillon.

2.3. Test pummel

Ce test a pour objet de déterminer l'adhérence de l'intercalaire PVB sur le verre.



Figure III.10 : Appareil de test pummel

Mode opératoire :

- Le test pummel peut être réalisé sur des configurations du type 33.1, 33.2, 44.1, 55.1 et 55.2 le test ne s'applique pas pour les fortes épaisseurs telles que 66.1 et 88.1.
- Placer les échantillons dans le congélateur à une température de (-18°C), laisser durant un intervalle de temps suffisant pour qu'ils atteignent une température d'équilibre qui dure généralement de 2 à 6 heures.
- L'essai doit commencer dans les secondes qui suivent la sortie de l'échantillon du congélateur.

Chapitre III : Matériels et méthodes

- Marteler les deux faces de l'échantillon Air, et Etain point par point
- Laisser les échantillons martelés revenir à une température ambiante avant de procéder à l'évaluation.
- Brosser légèrement l'échantillon martelé en éliminant les fragments de verre.
- Placer l'échantillon sur le fond noir.
- Comparer soigneusement l'échantillon testé aux standards d'adhérence du fournisseur correspondant au PVB utilisé afin d'identifier la classe à laquelle l'échantillon se rapproche le plus. Pour cela, incliner l'échantillon en même temps que la photo (standard) afin d'observer la réflexion du plastique et non du verre. Cette procédure est répétée avec d'autres photos jusqu'à ce que l'on trouve une bonne concordance (classe correspondante).
- Retourner l'échantillon et répéter l'évaluation de l'autre côté de la même manière.

Critères d'acceptation

La classe doit être entre 3 et 5.



Figure III.11 : Catalogue des classes de test pummel

Expression des résultats

Classer les échantillons testés selon les standards spécifiques à chaque fournisseur.

3. Verre à couches

3.1. Test de vieillissement UV

Les tests de vieillissement UV sont des tests destinés à simuler une exposition prolongée au soleil pour stocker. Dans ces essais, au lieu de la lumière solaire normale, on utilise la lumière ultraviolette (ultraviolette) fournie par des appareils spéciaux.es produits dans des conditions normales. Par conséquent, les effets à long terme de la lumière solaire sont atteints en moins de temps.



Figure III.12 : Chambre UV

Matériel et produits utilisés :

- Des échantillons de verre à couches.
- Appareil de mesure de la résistance de type NAGY SRM-12T.
- Spectrophotomètre (Lambda 1050 Perkin Elmer).

Mode opératoire :

- Poser l'échantillon au milieu du support prévu.

Chapitre III : Matériels et méthodes

- Régler la température du test à 50°C et le temps du cycle à 72 heures.
- Allumer le dispositif de chauffage et la lampe UV après avoir fermé l'appareil correctement (noter les heures de début et fin du test sur une fiche).

Interprétation des résultats

L'analyse laboratoire doivent faire la mesure des indices optiques ainsi que la résistance superficielle après test calculer les indices énergétiques.

3.2. Test de corrosion

Ce test a pour objet d'évaluer la résistance à la corrosion des couches lorsque le verre est soumis à une atmosphère saturée en eau à température constante.



Figure III.13 : Test de corrosion brouillard salin neutre

Matériel et produits utilisés:

- Appareil de mesure de la résistance.
- Enceinte de condensation.
- Stéréo-microscope optique.
- Appareil d'abrasion.

Mode opératoire :

1. Prélever des échantillons durant la semaine.

Chapitre III : Matériels et méthodes

2. Identifier ces échantillons « HP1 ».
3. Soumettre les échantillons de la semaine de production « HP1 » au test et le HP2 sert d'échantillon de référence qui permettra la comparaison.

Avant le test :

4. Noter les particularités de l'échantillon au préalable (tache, couleur, point de corrosion, rayures...etc.)
5. Déterminer la résistance superficielle des échantillons HP1 de la semaine de production.

Exécution du test :

6. Remplir l'enceinte climatisée de 5 litres d'eau déminéralisée de conductivité $<30\mu\text{S}$ (valeur PH : 5,5 – 6).
7. Grouper les échantillons de la semaine l'un sur l'autre et prolonger la couche du dernier échantillon avec du verre claire appelé « échantillon de protection ».
8. Mettre les échantillons sur le support prévu en position vertical.
9. Après avoir fermé le couvercle, régler le thermostat à une température de $T = (50 \pm 1,5) ^\circ\text{C}$ ainsi que la date et l'heure du début et fin du test.

Note : la durée du test est de 72 heures.

Evaluation des résultats

1. Retirer les échantillons de l'enceinte climatisée dès que le test est terminé.
2. Sécher les échantillons à l'air comprimé tout de suite après les avoir retirés et les nettoyer avec de l'alcool.
3. Déterminer de nouveau les résistances superficielles après le refroidissement des échantillons.
4. Effectuer ensuite un contrôle visuel des échantillons soumis au test de corrosion et les comparer chacun à leurs échantillons de référence.
5. Répéter la zone qui présente le plus de point de corrosion et l'analyse avec le stéréoscope optique.
6. Compter le nombre de point de corrosion dans 1mm^2
7. Effectuer le test Erichsen (abrasion) 10 coups pour tous les échantillons HP1 et comparer les résultats avec les échantillons de référence correspondant.

Microscope optique :

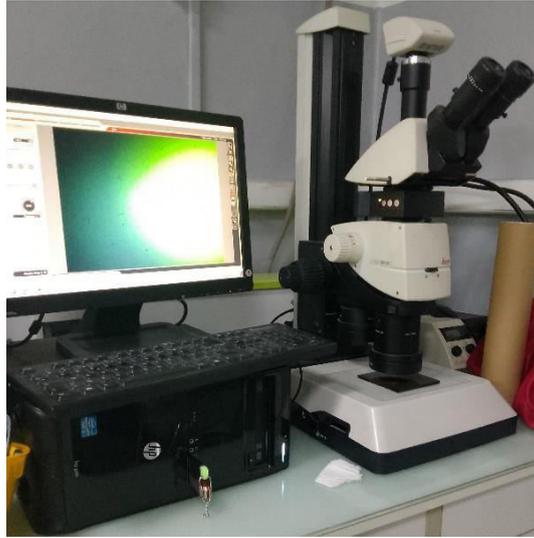


Figure III.14 : Microscope optique

3.3. Test de durabilité chimique accélérée (test d'immersion)

Comme le verre Co-Fe-Cr-O peut être installé avec la couche orientée vers l'extérieur, cette dernière doit être suffisamment robuste pour répondre aux exigences d'exposition en plein air pendant de nombreuses années. Pour ce type de verre, l'essai de durabilité chimique est un test d'immersion dans de l'acide sulfurique.

Matériel et produits utilisés :

- Bain d'immersion téflonisé d'une capacité de 10L.
- Acide sulfurique-eau, solution 10N.
- Un minuteur capable de mesurer 30min de temps en secondes.
- Une solution de nettoyage (un mélange d'isopropanol et d'eau distillée « 1 : 1 » ou un mélange 70% eau et 30% éthanol).
- Un spectrophotomètre lambda 1050.

Mode opératoire :

- Remplir le bain d'immersion par la solution d'acide sulfurique 10N (environ 08cm d'hauteur).
- Mettre en marche le bain d'immersion afin que la solution acide soit chauffée et maintenue à $52 \pm 1^\circ\text{C}$.

Chapitre III : Matériels et méthodes

- Réceptionner 5 échantillons du verre pyrolytique (d'une longueur d'environ 20cm) coupés à partir de 5 côtés d'une feuille de verre (droit « D », milieu droit « MD », milieu « M », milieu gauche « MG » et gauche « G »).
- Nettoyer et sécher les 5 échantillons du verre pyrolytique avec la solution de nettoyage.
- Plonger verticalement les 5 échantillons dans le bain puis déclencher le minuteur (30min).
- Dès que le temps s'écoule, on retire les échantillons à l'aide des gants antiacides, on les immerge dans une eau fraîche pour un rinçage initial ensuite, les nettoyez à froid avec de l'eau du robinet puis les nettoyez avec la solution de nettoyage ensuite les séchés.
- Mesurer les transmissions lumineuses pour chaque échantillon en commençant par la zone non traitée puis traitée (immergée dans l'acide).
- La variation de la transmission lumineuse est la différence entre la lecture de la zone non traitée et la zone traitée de l'échantillon. Cette différence ne doit pas dépasser le montant indiqué dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Δ LT limites (changement de transition de la lumière)

Couleur Epaisseur de verre	Bronze
4,00 mm	5,8 (7,0)
4,9 mm/5,0 mm	4,4 (5,5)
6,0 mm	3,9 (4,8)
8,0 mm	3,3 (4,0)

Le calcul de perte de couche se fait par la formule suivante :

$$\text{Le taux de perte de la couche \% } (\Delta TL) = (LT_2 - LT_1) \times 100 / (LT_3 - LT_1)$$

Avec :

LT_1 = le taux de transmission de lumière visible pour la zone non traitée de l'échantillon à couche.

LT_2 = le taux de transmission de lumière visible pour la zone traitée de l'échantillon à couche.

LT_3 = le taux de transmission de lumière visible pour le verre original (sans couche).

Le taux de la perte de couche doit être inférieur à 15% dans le test à l'acide sulfurique.

3.4. Test de colorimétrie

Ce test a pour objet la détermination des propriétés optiques (transmission, réflexion et absorption) ainsi que les indices de colorimétrie du verre à couches.

Matériel et produits utilisés :

- Des échantillons de verre à couche.
- Machine PRO SCAN.



Figure III.15 : Appareil PRO SCAN

Mode opératoire :

Préparation des échantillons

- Réaliser le prélèvement des échantillons de dimensions 100×100 mm.
- Nettoyer les échantillons avec de l'air comprimé.

Mode d'utilisation du PRO SCAN

Mode transmission :

- Placer l'échantillon sur le port de transmission.
- Placer l'étalon blanc sur le port de réflexion.
- Lancer la mesure.
- Identifier l'échantillon.
- Enregistrer les résultats.

Mode réflexion :

Chapitre III : Matériels et méthodes

- Enlever le bas et placer l'échantillon sur le port de réflexion.
- Lancer la mesure.
- Identifier l'échantillon.
- Enregistrer les résultats.

Evaluation des résultats

Les résultats doivent être comparable à la fiche technique des produits correspondants l'analyse. Toute anomalie doit être signalée.

3.5. Test de trempe thermique

Ce test a pour objet d'augmenter la résistance et la rigidité du verre à couche aux chocs.

Matériel et produits utilisés :

- Des échantillons de verre à couches (dimensions 100×100 mm)
- Four à moufle.
- Un chronomètre.
- Spectrophotomètre (λ 1050).



Figure III.16 : Four à moufle



Figure III.17 : Spectrophotomètre

Mode opératoire :

- Nettoyer bien les échantillons du verre
- Mettre le four à une température de $650 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Mettre les échantillons dans le four (cette opération se fait dans de différentes durée 14, 16 et 18 min à l'aide d'un chronomètre).
- Quand le temps se passe enlever les échantillons et les mettre coté jusqu'à ce qu'ils deviennent à la température ambiante.
- Faire passer chaque échantillon dans le spectrophotomètre et enregistrer les résultats.

Les analyses effectuées au niveau d'électroménager

Test de fragmentation

Le verre de silicate sodocalcique de sécurité trempé thermiquement possède une tenue de bris plus sûr, lorsqu'il convient de l'utiliser pour offrir une protection en cas d'impact humain accidentel.

Matériel et appareils utilisés :

- Outil pointu en acier.
- Un gabarit $(50 \times 50) \pm 1\text{mm}$.
- Compteur de fragments.
- Eprouvette d'essai (éprouvette-commande ayant une dimension dépassant les $76\text{mm} \times 76\text{mm}$).



Figure III.18 : Fragmentation après chocs.

Mode opératoire :

Chaque éprouvette (soutenue sur sa totalité par un film adhésif) est soumise à un impact à l'aide d'un outil pointu en acier, en un point situé à 13 mm vers l'intérieur par rapport au bord le plus long de l'éprouvette et au milieu de celui-ci jusqu'à ce qu'une cassure se produise. L'éprouvette doit reposer à plat sur une table sans aucune contrainte mécanique, afin d'éviter la disposition des fragments. L'éprouvette, soutenue sur sa surface totale, est maintenue simplement au niveau de ses bords ; par exemple par un petit cadre, du ruban adhésif, ...etc., où l'éprouvette est maintenue sans empêcher l'allongement de l'éprouvette.

Evaluation de la fragmentation

- Le comptage des particules et le mesurage des dimensions de la plus grande particule doivent être réalisés dans les 5 min après la fracture.
- Une zone de 13 mm de diamètre centrée sur le point d'impact et autour du bord de l'éprouvette doit être exclue de l'évaluation.
- Le comptage des particules doit être effectué dans la région de la plus grosse fragmentation, le but étant d'obtenir la valeur minimale.
- Le comptage des particules doit être réalisé en plaçant un gabarit de $(50 \times 50) \pm 1$ mm sur l'éprouvette.
- Le nombre de particules exemptes de fissures doit être compté dans les limites du gabarit.
- Une particule est exempte de fissure si elle ne contient aucune fissure allant d'un bord à l'autre.
- Choisir la zone de fragmentation la plus importante et placer le gabarit sur l'éprouvette et tracer le pourtour du gabarit.
- * Marquer et compter les fragments périphériques (chacun comme demi-particule) et centraux :
 - Y : Nombre de particule périphérique de deux cotés adjacents.
 - Z : Nombre de particules centrales.
- * Calculer N, le nombre total des particules dont $N = Y + Z$.

Le nombre de fragments supérieur ou égal à 60 fragments (≥ 60 fragments).

Conclusion

Les différents appareils, les méthodes d'analyse et de caractérisation du verre utilisées au sein de l'usine MFG ont été exposés dans ce chapitre. Il s'agit de la granulométrie, de la densité, bain thermostatique, la fluorescence X , la microscopie optique, les tests de corrosion et d'humidité, la chambre UV, test de colorimétrie et enfin le test Pummel qui détermine l'adhérence du PVB (Butyral Polyvinyle) avec le verre.

Chapitre IV

Résultats et discussion

IV) Résultats et discussion [18-27]

Introduction

Dans ce dernier chapitre, on donne les résultats des tests de contrôles de qualités effectués sur un verre plat, feuilleté et un verre trempé (d'électroménager). Et une étude des propriétés physico-chimiques de deux verres à couches : l'un est élaboré par MFG et l'autre par AGC.

I. Les tests du Verre clair

I.1. Analyse granulométrique

I.1.1. Sable

Nous allons présenter les mesures de granulométrie des matières premières MFG :

Les chiffres présentés dans les tamis sont le diamètre en micromètre des trous de chaque tamis, le chiffre 0 représente le fond récupéré après le dernier tamis.

On met $m_0 = 493,2$ g

Tableau IV.1 : Analyse granulométrique du sable MFG.

Tamis (mm)	Poids vide (g)	Poids rempli (g)	Poids retenus (g)	Pourcentage de refus (fraction massique) (%)
2	349,8	349,8	0	0
1	303,1	303,1	0	0
0.63	291,6	292,1	0,5	0
0.5	283,4	292,9	9,5	2
0.4	262,9	312,0	49,1	10
0.315	263,9	391,7	127,8	26
0.25	249,9	376,7	126,8	26
0.2	281,6	360,1	78,5	16
0.16	240,3	297,7	57,4	12
0.106	236,9	271,5	34,6	7
0	345,0	352,9	7,9	2
L'humidité ≤ 5%	L'humidité = 4.43%			

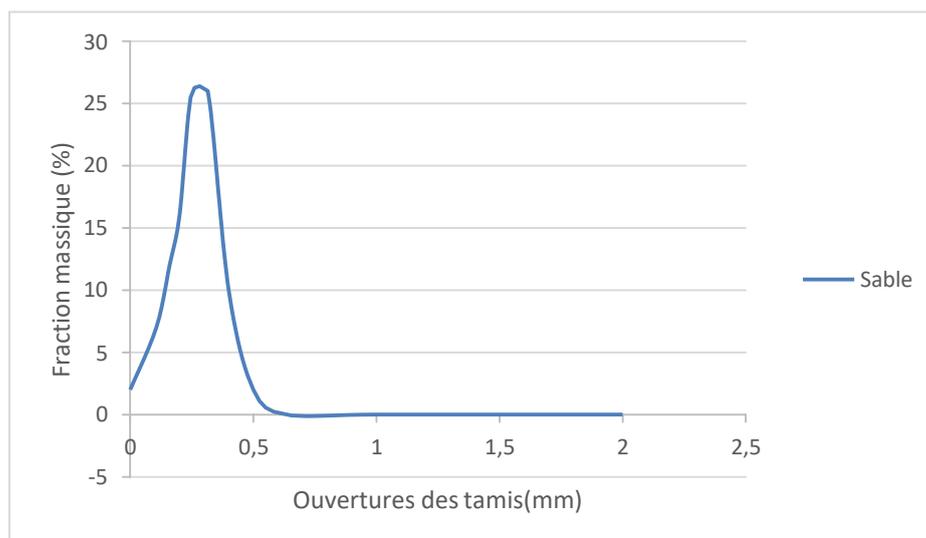


Figure IV.1 : Courbe d'analyse granulométrique du sable.

On remarque que la distribution suit une courbe gaussienne autour de 0.25 mm, avec un refus 26 %.

On observe que les particules de taille 0.25 mm sont les prédominantes dans l'échantillon avec une pauvreté des fines et grosses particules (0% pour les grosses ≥ 0.63 mm et 9% pour les fines ≤ 0.106)

Et donc selon les résultats on trouve que le sable destiné pour la fabrication du verre est conforme.

I.1.2. Feldspath

Pour sa granulométrie on utilise les tamis suivants : 2 ; 1 ; 0.710 ; 0.630 ; 0.5 ; 0.315 ; 0.106 ; 0

On met $m_0 = 469,3g$.

Tableau IV.2 : Analyse granulométrique du feldspath MFG.

Tamis (mm)	Poids vide (g)	Poids rempli (g)	Poids retenus (g)	Pourcentage de refus cumulé (%)
2	0	0	0	0
1	0,1	0,1	0	0
0.71	4,4	4,5	0,1	1
063	8,7	13,2	4,5	2
0.5	37,1	50,3	13,2	8
0.315	169,7	220,0	50,3	36
0.106	231,8	451,8	220	49
0	17,5	469,3	451,8	4
L'humidité $\leq 5\%$	L'humidité = 0,09%			

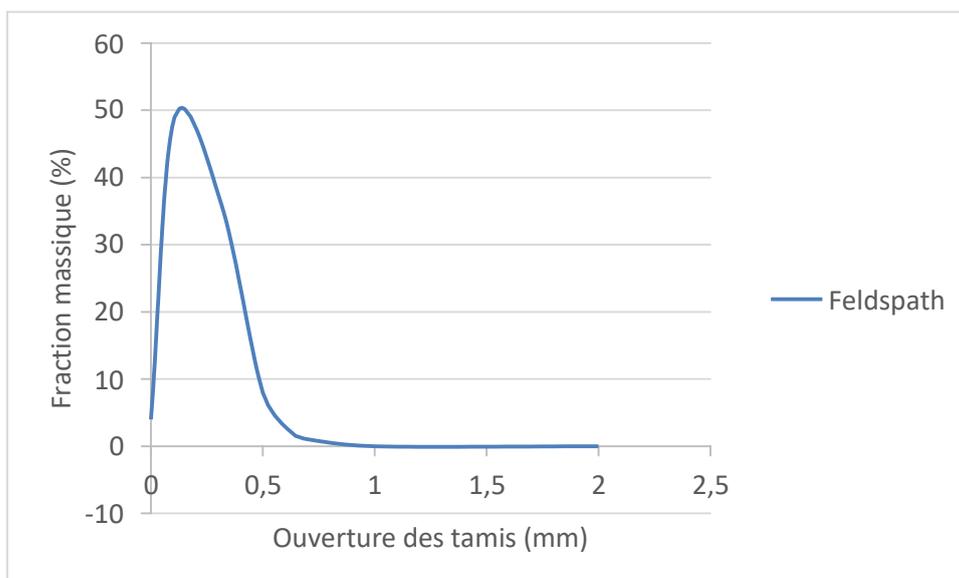


Figure IV.2 : Courbe d'analyse granulométrique du feldspath.

On observe que la distribution est proche de la gaussienne autour de 0.106 mm, avec un refus de 49 % qui est dans les normes, la perte de masse durant l'essai est nulle. On observe que notre échantillon est pauvre en grosse particules (≥ 1 mm) avec un refus de 0%.

I.2. Analyse par fluorescence X

I.2.1. Sable

Voici des résultats d'une analyse effectuée par la fluo à la date du 05/03/2023 **MFG**



Figure IV.3 : L'échantillon (perle) avant et après l'analyse par fluorescence X.

Tableau IV.3 : Analyse chimique par fluorescence X du sable.

CODE-ECH	Teneur											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	CaO	MgO	MnO	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	PF
Sable 5/03/2023-STAO	99,28	0,26	0,090	0,007	0,0542	0,07	0,05	0,0029	0,0018	0,0007	0,011	0,17

Ce sable est très riche en silice atteignant la norme qui exige 99.28% au minimum, l'alumine par contre est à 0.26% et doit être inférieure à 0.3% pour la norme du verre sodo-calcique, le sable contient une quantité considérable d'oxyde de fer qui doit être prise en compte car il donne la coloration au verre.

I.2.2. Dolomie

En suivant les étapes du mode opératoire IN-CQ-01.13 de MFG, on a effectué l'analyse de la dolomie pour tirer les pourcentages des éléments suivants : CaO, MgO, Al₂O₃, Fe₂O₃, SiO₂ et la PAF.

Tableau IV.4 : Analyse chimique par fluorescence X de dolomie.

CODE-ECH	Teneur					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	PF
Dol-05/03/2023-Silo	0,24	0,02	0,045	30,61	21,08	48,03

La dolomie présente plusieurs valeurs non conformes à la norme, tel que la présence de silice qui est à 0,24% alors qu'elle doit être à moins de 0,1%, et l'oxyde de fer, les éléments principaux de la dolomie sont le CaO et MgO et leurs exigences sont à au moins 31 et 21%.

I.3. Analyse de produit fini et l'identification des types de défauts dans le verre float

I.3.1. Définition d'un défaut de verre

Un défaut du verre est un défaut du matériau fini apparus lors de sa fabrication.

I.3.2. Types des défauts du verre float

Il existe deux types de défauts du verre float principaux :

- **Défaut d'aspect** ; exemple : - Bulles : Inclusions gazeuses (cavité remplie de gaz) dans le verre. Ces inclusions présentent presque toujours un aspect brillant et de forme elliptique. Le terme « puce » désigne les bulles dont la dimension est inférieure à 5,5 mm et le terme « bouillons » s'applique à toutes les inclusions de longueur supérieure à 6 mm.
- **Défaut ponctuel** ; exemple : - Pierres : (inclusion solide) 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 silice réfractaire (...)

I.3.3. Les défauts et les causes

Tableau IV.5 : Les défauts et les causes

Types de défauts	La cause
Bulle d'air	<ul style="list-style-type: none"> - Perturbation des paramètres du four (pression, température) - L'atmosphère de point chaud est plus oxydée de manière que SO₃ ne peut pas évacuer. - L'insuffisant de l'argent de décantation (sulfate de soude). - Suppression de la partie de refroidissement. - Température de décantation est plus basse.
Pierre de zircon	- Chute de pierres de zircon après corrosion des briques réfractaires dans le four.
Pierre de silice (trydimite, cristobalite)	- Fusion incomplète de la silice
Pierre d'étain en forme de corail	<ul style="list-style-type: none"> - Oxydation de l'étain dans le bain à cause de l'introduction de l'oxygène à l'intérieur. - Recyclage de calcin contient d'oxyde d'étain
Tache d'oxyde d'étain, impuretés sur la surface inférieure	- Frottement entre les rouleaux et la plaque du verre
Gouttelette d'étain en métal superficielle	- Nettoyage du ban d'étain
Une série des pierres	- Fusion incomplètes de silice et de l'alumine
Néphéline et de quartz avec déformation optique	
Néphéline	- Fusion incomplète du feldspath
Déformation optique (rime)	- Problème dans les balances ou perturbation au niveau de l'étenderie.
Pierre de sulfate	<ul style="list-style-type: none"> - Déséquilibre dans la proportion sulfate/ charbon. - Perturbation dans les paramètres du four (température de point chaud un peu basse, flamme un peu forte de telle façon le charbon se brule avant d'établir son rôle.
Corindon	- Mauvaise fusion de l'alumine contenant dans le feldspath ou corrosion des briques réfractaires du four contenant un taux élevé d'alumine.

I.3.4. Techniques expérimentales (Analyses optique)

Analyser le produit fini à l'aide du microscope optique au niveau du laboratoire central qui possède une base de données extrêmement riche, constituée d'image de défauts, avec lesquelles nous

comparons les images que nous avons obtenues lors de l'analyse. C'est ainsi qu'on peut identifier le type du défaut observé.

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

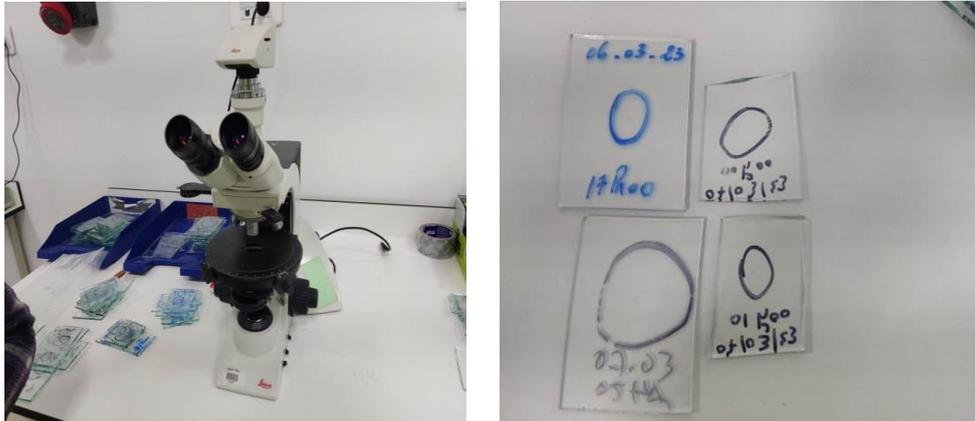


Figure IV.4 : Contrôle par Microscope optique de marque Leica (MFG) PPN.

- **Résultat** :

1. Bulle d'air

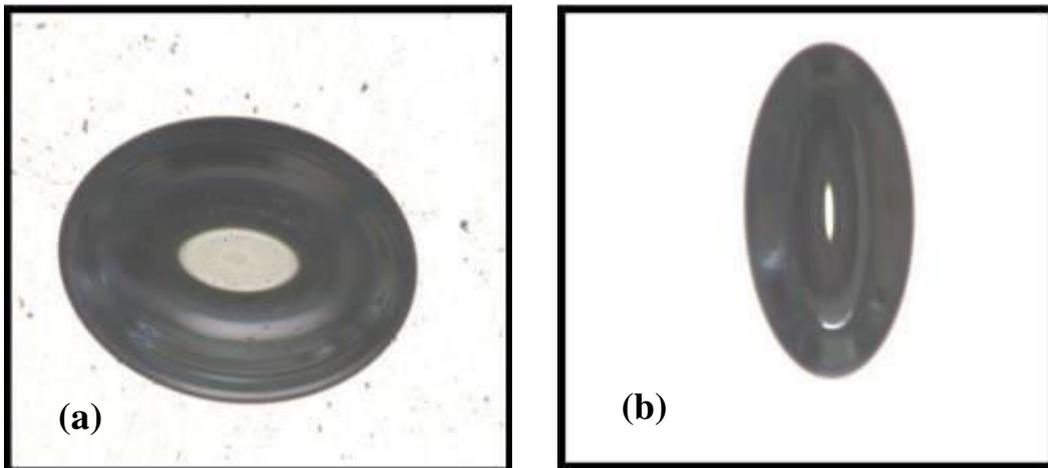


Figure IV.5 : a) Bulle d'air avec sulfate PPN ; b) Bulle d'air sans sulfate PPN.

2. Pierre de Quartz

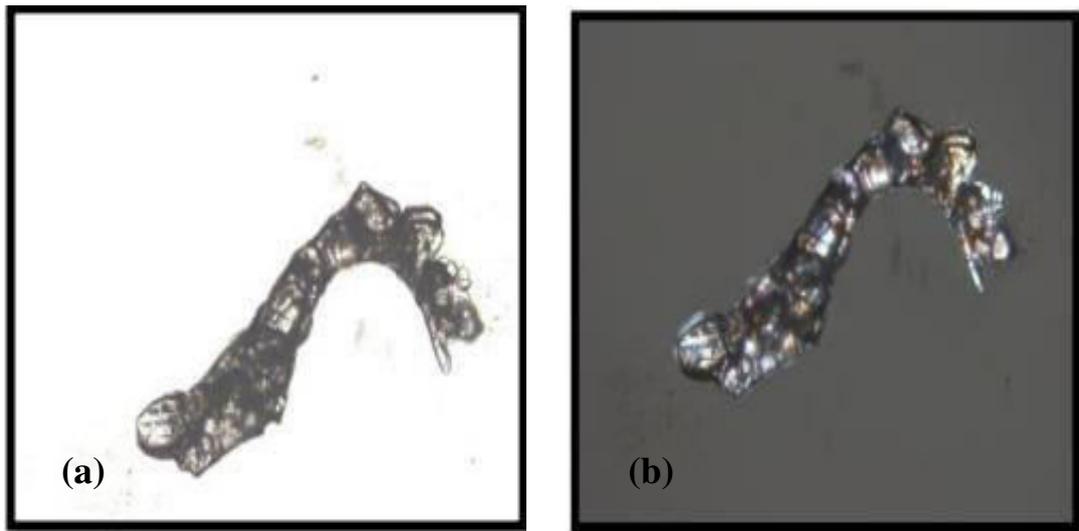


Figure IV.6 : a) Quartz 1 PNN ; b) Quartz 1 (sous la lumière orthogonal) PNN.

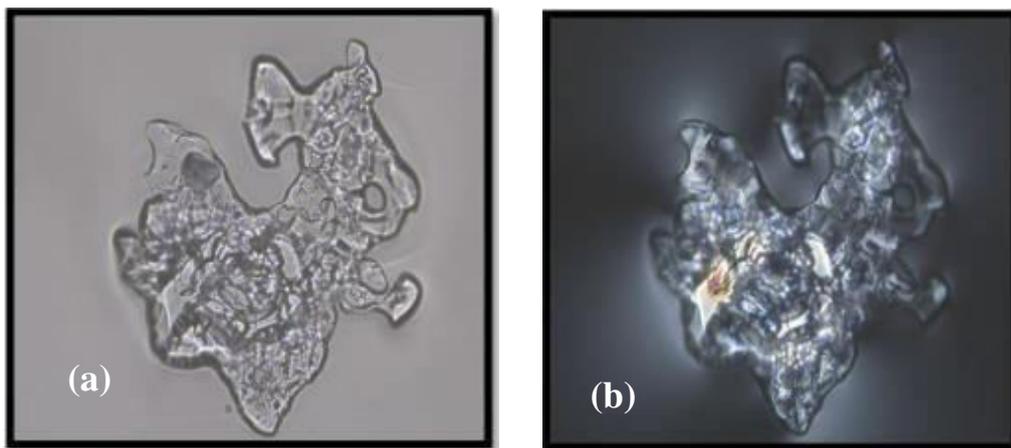


Figure IV.7 : a) Quartz 2 PNN ; b) Quartz 2 (sous la lumière orthogonal) PNN.

3. Pierre de Zircon

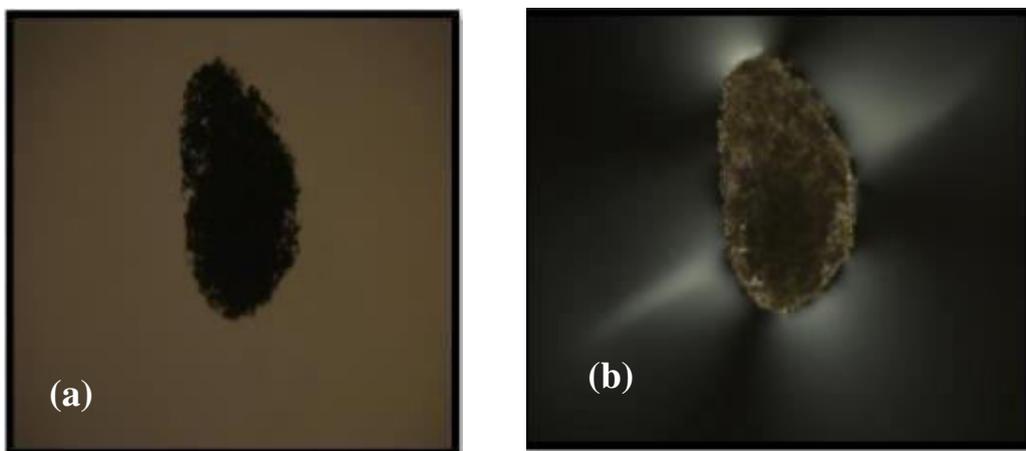


Figure IV.8 : a) Zircon 1 PPN ; b) Zircon 1 (sous la lumière orthogonal) PPN.

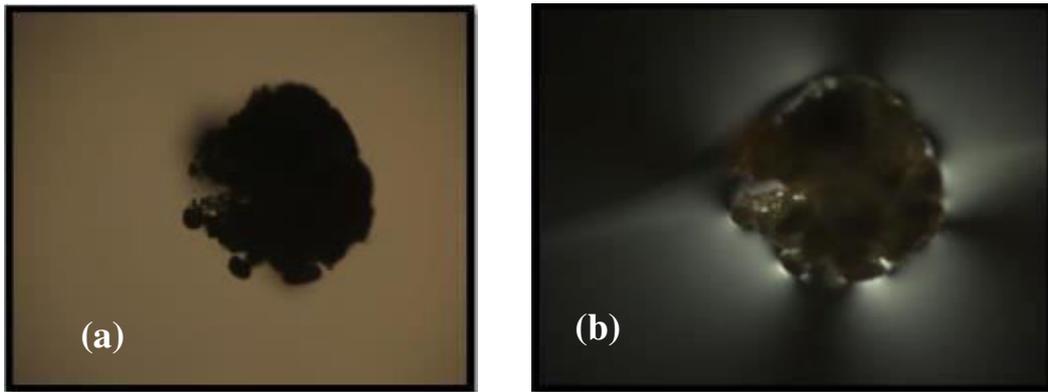


Figure IV.9 : a) Zircon 2 PPN ; b) Zircon 2 (sous la lumière orthogonal) PPN.

4. Corindon

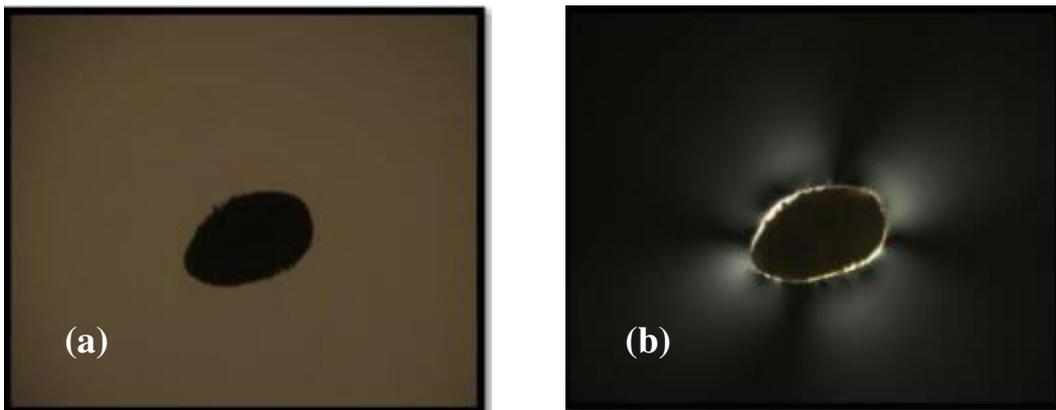


Figure IV.10 : a) Corindon PPN ; b) Corindon (sous la lumière orthogonal) PPN.

5. Pierre de Diopside

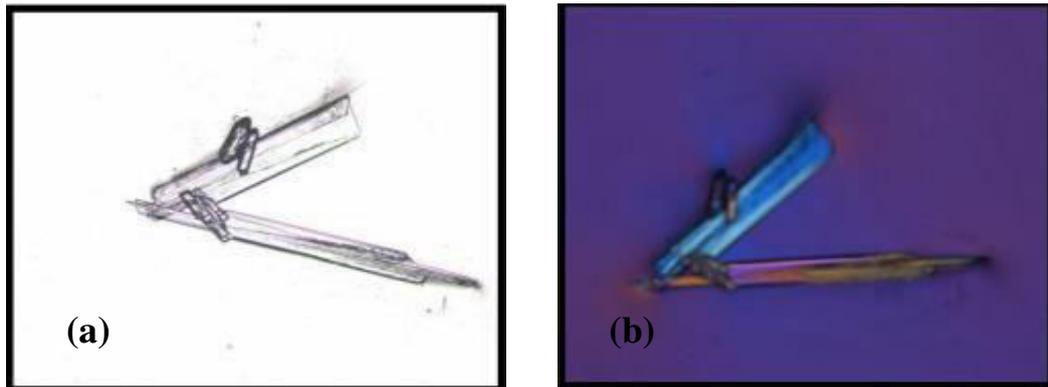


Figure IV.11 : a) Diopside PNN ; b) Diopside (sous la lumière orthogonal) PNN.

6. Pierre d'Oxyde d'Etain

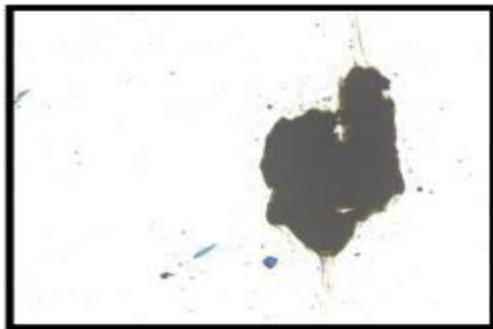


Figure IV.12 : Pierre d'Oxyde d'Etain PNN.

7. Tâche d'Etain inférieure



Figure IV.13 : Tâche d'Etain inférieure PPN.

8. Tâche d'Oxyde d'Etain (Traces des rouleaux)

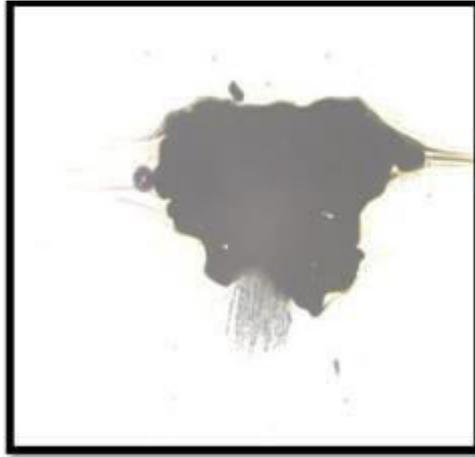


Figure IV.14 : Tâche d'Oxyde d'Etain PPN.

II. Verre feuilleté

Echantillon 1 : 44.1

4= 1 verre de 4 mm

4= 1 verre de 4 mm

1= 1 film PVB de 0.38 mm

Echantillon 2 : 44.2

4= 1 verre de 4 mm

4= 1 verre de 4 mm

2= 1 film PVB de 0.76 mm

II.1. Test d'ébullition

Résultats du test d'ébullition dans les tableaux suivants :

Tableau IV.6 : Résultats de test d'ébullition (44.1).

Nombre de défauts		
Echantillon 1 : 44.1		Interprétation
Centre	00	Absence totale de tout signe de dégradation qualitative à 100°C Le résultat est conforme à la norme ISO 12543-4
Bord naturel	00	
Bord coupé	00	
Echantillon 2 : 44.2		Interprétation
Centre	00	Absence totale de tout signe de dégradation qualitative à 100°C Le résultat est conforme à la norme ISO 12543-4
Bord naturel	00	
Bord coupé	00	

II.2. Test à haute température (étuvage)

Résultats du test à haute température dans les tableaux suivants :

Tableau IV.7 : Résultats de test d'étuvage.

		Nombre de défauts				Interprétation
		16 hrs 100°C	1 hrs 110°C	1 hrs 120°C	1 hrs 130°C	
Echantillon 1	Centre	00	00	00	00	Absence totale de tout signe de dégradation qualitative à 130°C
	Bord naturel	00	00	00	00	
	Bord coupé	00	00	00	00	
Echantillon 2	Centre	00	00	00	00	Absence totale de tout signe de dégradation qualitative à 130°C
	Bord naturel	00	00	00	00	
	Bord coupé	00	00	00	00	

Le cas où les résultats sont non conformes :

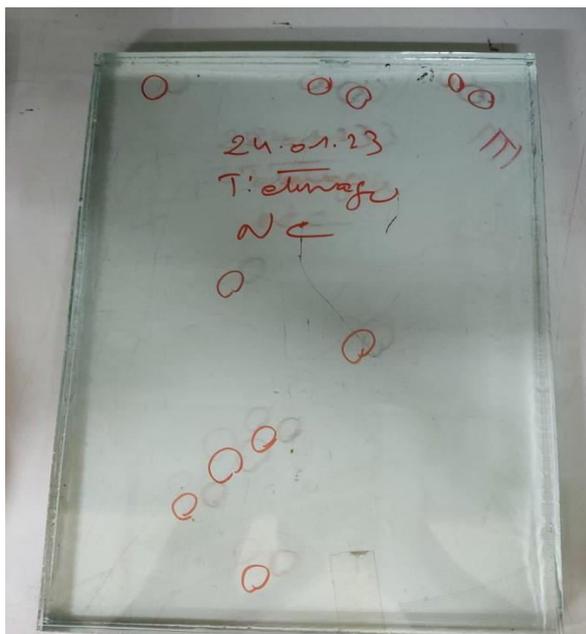


Figure IV.15 : Résultats de test d'étuvage non conforme.

II.3. Test Pummel

Résultat du test pummel comme suit:



Figure IV.16 : Résultat de test pummel.

Interprétation :

Comme les résultats sont de la classe 4 donc ce verre est conforme.

III. Verre à couches

De différents tests seront effectués sur ce type de verre, et leurs résultats sont comme suite :



Figure IV.17 : Les échantillons du verre coté film.



Figure IV.18 : Les échantillons du verre coté glass.

Tableau IV.8 : Les paramètres des deux verres.

	Solar Bronze 20	Stop Sol Classic Bronze (pyrolytique)
Epaisseur (mm)	6	4.93
Emissivité	0.5	0.83
Résistivité (Ω)	50	50

III.1. Test de vieillissement UV

Les résultats d'analyse du test de vieillissement UV sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau IV.9 : Résultats avant test UV (échantillon 1).

Simple vitrage	
Domaine solaire	$T_S = 15,26\%$ $R_F = 39,60\%$ $A = 45,15\%$ $R_G = 15,94\%$ $A = 68,80\%$
Visible	$T_V = 20,57\%$ $R_F = 36,77\%$ $A = 42,66\%$ $R_G = 11,95\%$ $A = 67,48\%$
Transmettant	$T_{UV} = 10,22\%$ $R_a = 91\%$ Facteur solaire $g_i = 24,87\%$

Tableau IV.10 : Résultats avant test UV (l'échantillon 2).

Simple vitrage	
Domaine solaire	$T_S = 29,80\%$ $R_F = 27,84\%$ $A = 42,36\%$ $R_G = 11,27\%$ $A = 58,93\%$
Visible	$T_V = 22,13\%$ $R_F = 33,26\%$ $A = 44,61\%$ $R_G = 12,43\%$ $A = 65,44\%$
Transmettant	$T_{UV} = 5,45\%$ $R_a = 84,08\%$ Facteur solaire $g_1 = 40,69\%$

- Avant UV

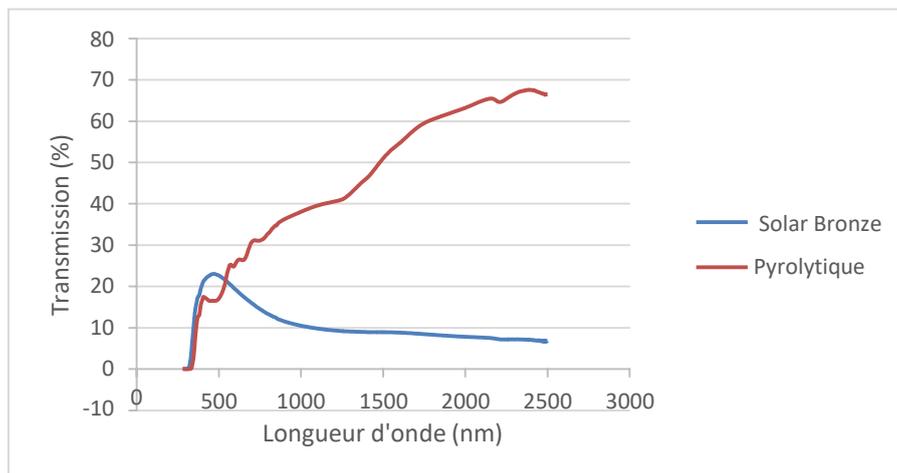


Figure IV.19 : Pourcentage de transmission en fonction de longueur d'onde avant UV.

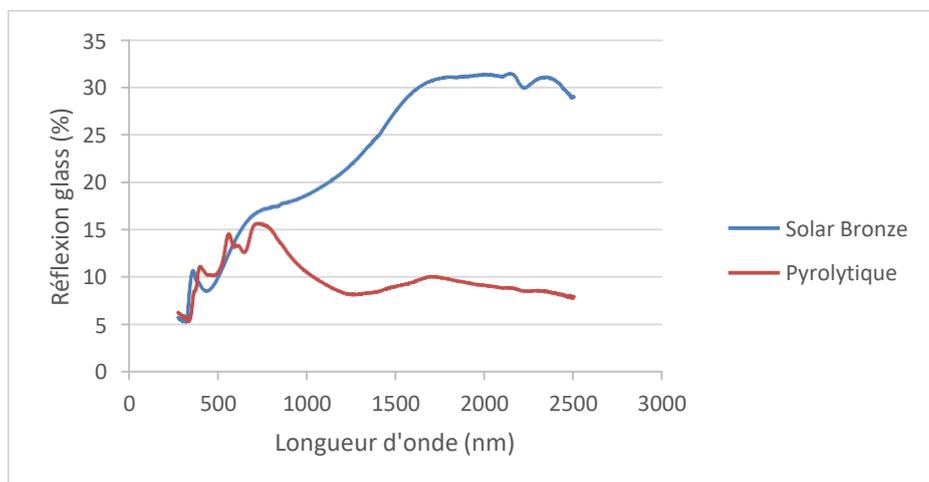


Figure IV.20 : Pourcentage de réflexion coté glass en fonction de longueur d'onde avant UV.

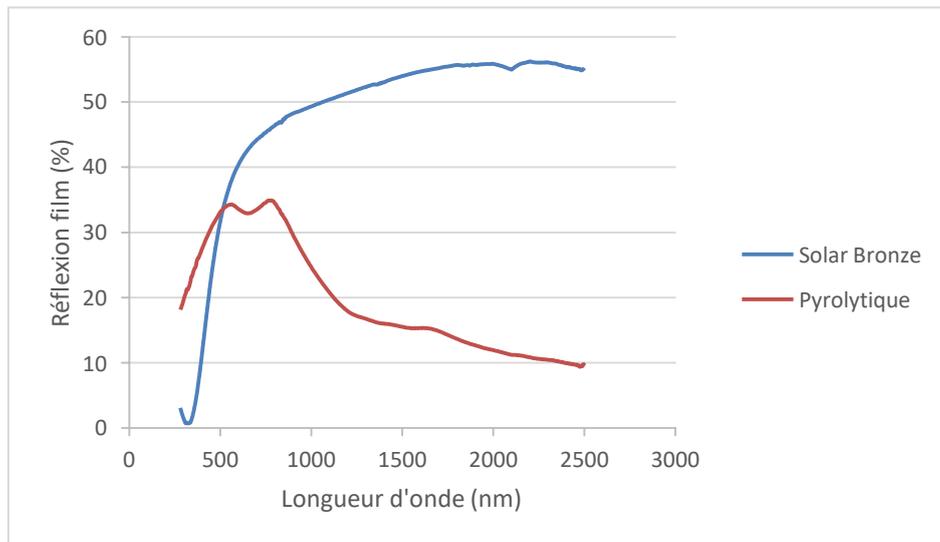


Figure IV.21 : Pourcentage de réflexion coté film en fonction de longueur d'onde avant UV.

Interprétation

Les trois graphes précédents représentent la variation des caractéristiques optiques du verre en termes de transmission, réflexion et absorption de la lumière pour la radiation solaire et le spectre visible dans un intervalle de longueur d'onde fixe,

- 1^{er} graphe : on a une augmentation très importante pour le verre pyrolytique par rapport au Solar bronze, donc la transmission est plus élevée dans le pyrolytique,
- 2^{ème} graphe : pour le côté glass on remarque que la réflexion est importante dans le verre Solar bronze,
- 3^{ème} graphe : pour le côté film on trouve que la réflexion du Solar bronze est très importante par rapport au pyrolytique,

- Après UV

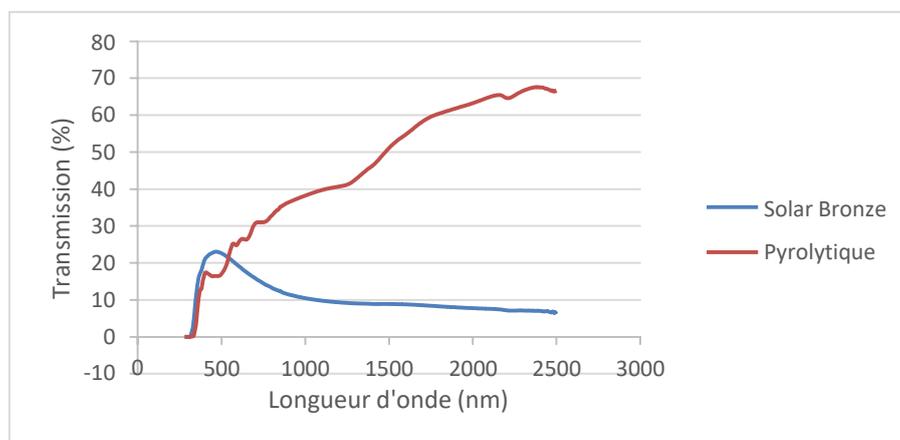


Figure IV.22 : Pourcentage de transmission en fonction de longueur d'onde après UV.

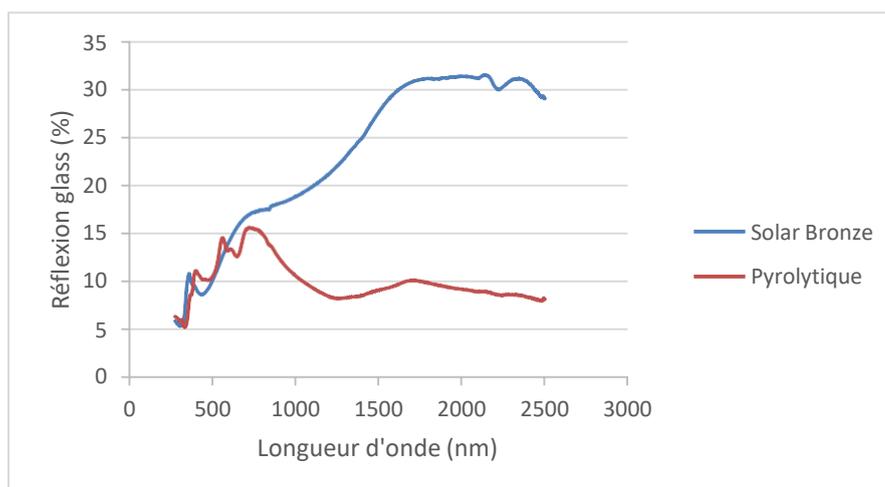


Figure IV.23 : Pourcentage de réflexion coté glass en fonction de longueur d'onde après UV.

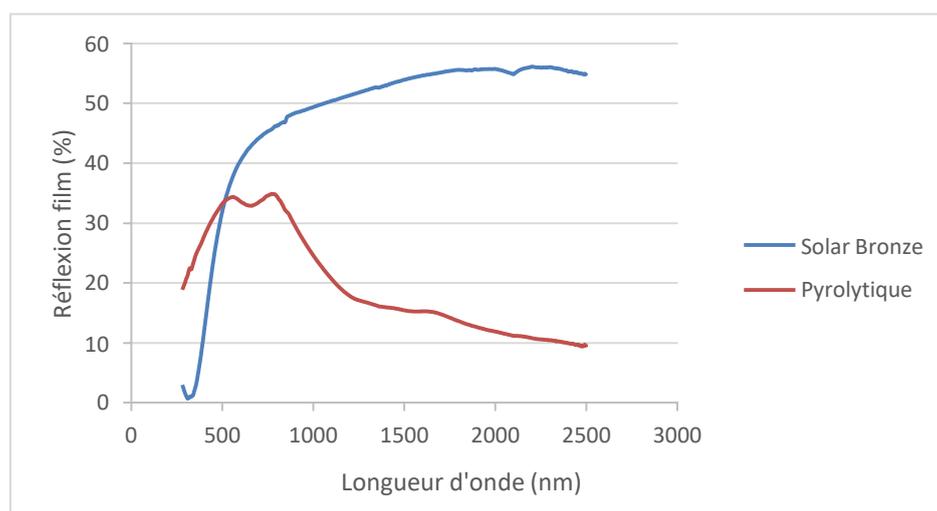


Figure IV.24 : Pourcentage de réflexion coté film en fonction de longueur d'onde après UV.

Interprétation

Les trois graphes représentent les résultats après le test de vieillissement UV,

- 1^{er} graphe : pour la transmission on voit que la valeur dans le pyrolytique continue à s'augmenter par rapport au Solar bronze qui se diminue progressivement (les valeurs de Solar bronze sont les mêmes qu'avant UV),
- 2^{ème} et 3^{ème} graphes : il n'y a pas de changement dans le pourcentage de réflexion (glass et film) dans les deux types de verre,

Conclusion

- Le test de vieillissement UV ne change pas les valeurs du pourcentage de transmission du Solar bronze, donc le pyrolytique a une meilleure absorption de la lumière qui est moins prononcée que l'autre, Avec une stabilisation de réflexion (glass et film) pour les deux verres.

III.2. Test de corrosion

Les résultats du test de corrosion sont résumés dans les tableaux suivants :

Tableau IV.11 : Résultats de test de corrosion avant et après 5 jours pour l'échantillon 1.

	Identification du produit	Identification supplémentaire	L*	a*	b*	Y	dE
Solar Bronze 20	transmission	Avant 5 jours	52,72	-3,26	-3,59	20,79	
		Après 5 jours	46,54	-2,27	0,91	15,67	
	Ecart		6,18	-0,99	-4,5	5,12	7,709
	Réflexion Glass	Avant 5 jours	41,25	3,31	9,3	12,02	
		Après 5 jours	36,23	5,1	8,49	9,13	
	Ecart		5,02	-1,79	0,81	2,89	5,391
	Réflexion Film	Avant 5 jours	66,63	-1,25	19,11	36,15	
		Après 5 jours	78,57	-0,77	0,37	54,18	
	Ecart		-11,9	-0,48	18,74	-18,03	22,23

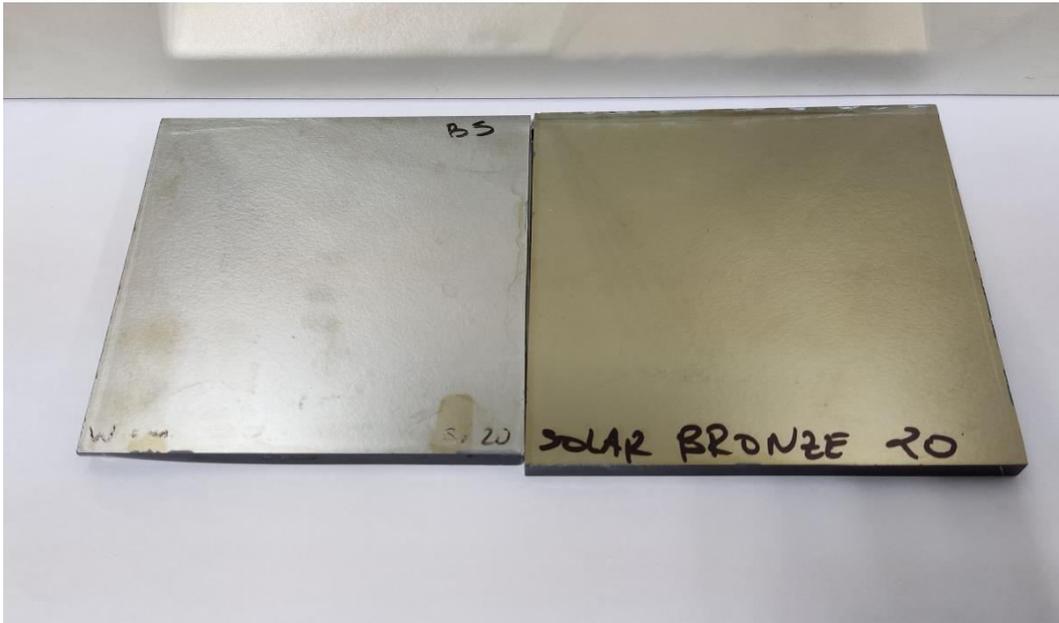


Figure IV.25 : Le côté film de l'échantillon 1 après 5 jours.

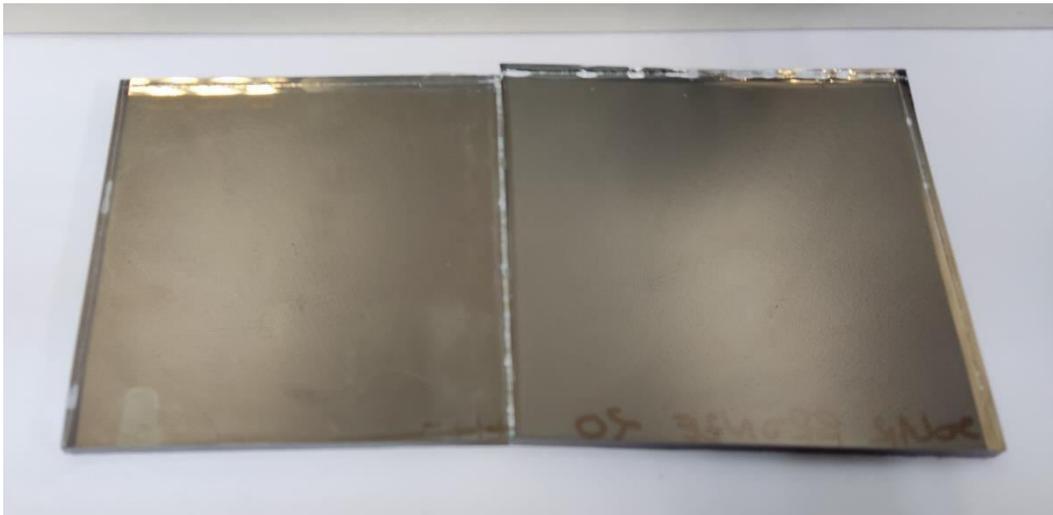


Figure IV.26 : Le côté glass de l'échantillon 1 après 5 jours.

Interprétation

Les résultats avant et après le test de corrosion montrent que les indices optiques sont changés tout en restant dans l'intervalle d'acceptation.

- Si $De > 2\%$, cela veut dire qu'il y'a un changement de couleur de la couche, donc elle se dégrade.

Tableau IV.12 : Résultats test de corrosion avant et après 5 jours pour l'échantillon 2.

	Identification du produit	Identification supplémentaire	L*	a*	b*	Y	dE
Pyrolytique	transmission	Avant 5 jours	54,93	4,62	11,51	22,86	
		Après 5 jours	54,85	4,61	11,49	22,79	
	Ecart		0,08	0,01	0,02	0,07	0,083
	Réflexion Glass	Avant 5 jours	41,64	0,23	6,04	12,27	
		Après 5 jours	41,46	0,29	6,09	12,15	
	Ecart		0,18	-0,06	-0,05	0,12	0,196
	Réflexion Film	Avant 5 jours	64,31	-2,51	2,84	33,18	
		Après 5 jours	64,25	-2,5	2,8	33,11	
	Ecart		0,06	-0,01	0,04	0,07	0,073



Figure IV.27 : Le côté film de l'échantillon 2 après 5 jours.



Figure IV.28 : Le côté glass de l'échantillon 2 après 5 jours.

Tableau IV.13 : Résultats test de corrosion avant et après 21 jours pour l'échantillon 2.

	Identification du produit	Identification supplémentaire	L*	a*	b*	Y	dE
Pyrolytique	transmission	Avant 21 jours	55,77	4,44	11,3	23,68	
		Après 21 jours	56,26	4,54	11,43	24,17	
	Ecart		-0,49	-0,1	-0,13	-0,49	0,51672043
	Réflexion Glass	Avant 21 jours	42,05	0,18	6,07	12,53	
		Après 21 jours	41,58	0,04	5,75	12,23	
	Ecart		0,47	0,14	0,32	0,3	0,58557664
	Réflexion Film	Avant 21 jours	63,67	-2,41	3,83	32,39	
		Après 21 jours	63,22	-2,58	2,65	31,86	
	Ecart		0,45	0,17	1,18	0,53	1,27428411



Figure IV.29 : Le côté film de l'échantillon 2 après 21 jours.



Figure IV.30 : Le côté glass de l'échantillon 2 après 21 jours.

Interprétation

Les résultats avant et après du test de corrosion montrent que les indices optiques sont changés tout en restant dans l'intervalle d'acceptation.

D'après la norme de l'entreprise MFG, la limite d'acceptation est de $De < 2$. Alors notre verre est conforme aux exigences de l'entreprise.

Tableau IV.14 : Résultats test de corrosion avant et après 21 jours pour l'échantillon 1.

	Identification du produit	Identification supplémentaire	L*	a*	b*	Y	dE
Solar Bronze 20	transmission	Avant 21 jours	52,72	-3,26	-3,59	20,79	
		Après 21 jours	46,54	-2,27	0,91	15,67	
	Ecart		6,18	-0,99	-4,5	5,12	7,709
	Réflexion Glass	Avant 21 jours	41,25	3,31	9,3	12,02	
		Après 21 jours	36,23	5,1	8,49	9,13	
	Ecart		5,02	-1,79	0,81	2,89	5,391
	Réflexion Film	Avant 21 jours	66,63	-1,25	19,11	36,15	
		Après 21 jours	78,57	-0,77	0,37	54,18	
	Ecart		-11,9	-0,48	18,74	-18,03	22,23

- Les résultats avant et après 21 jours sont les mêmes qu'avant et après 5 jours.

- **Avant le test**

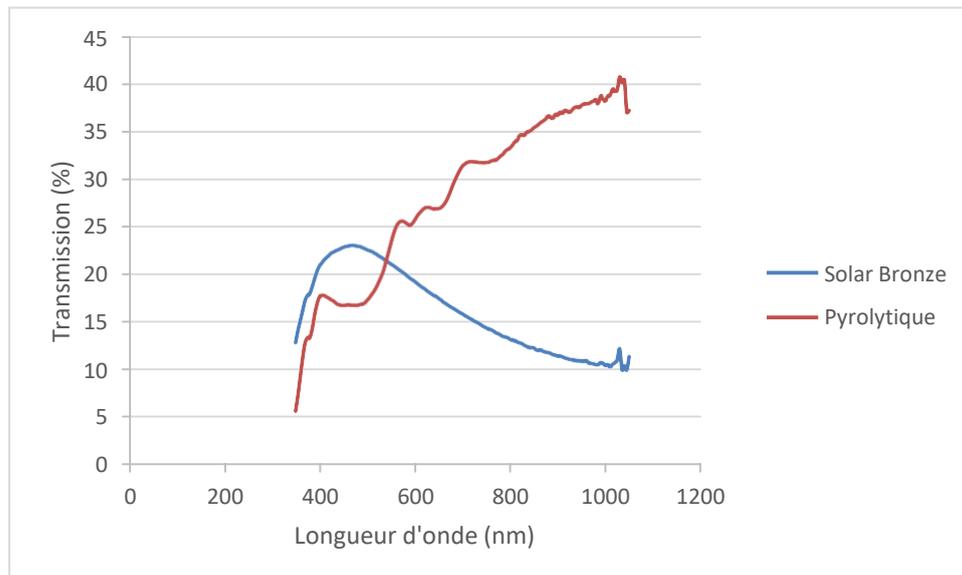


Figure IV.31 : Pourcentage de transmission en fonction de longueur d'onde avant test.

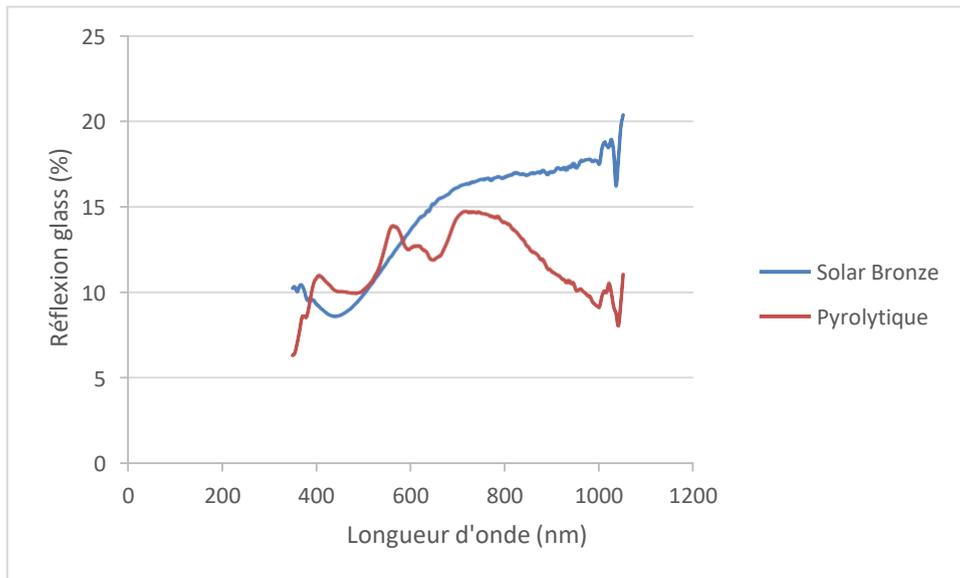


Figure IV.32 : Pourcentage de réflexion coté glass en fonction de longueur d'onde avant test.

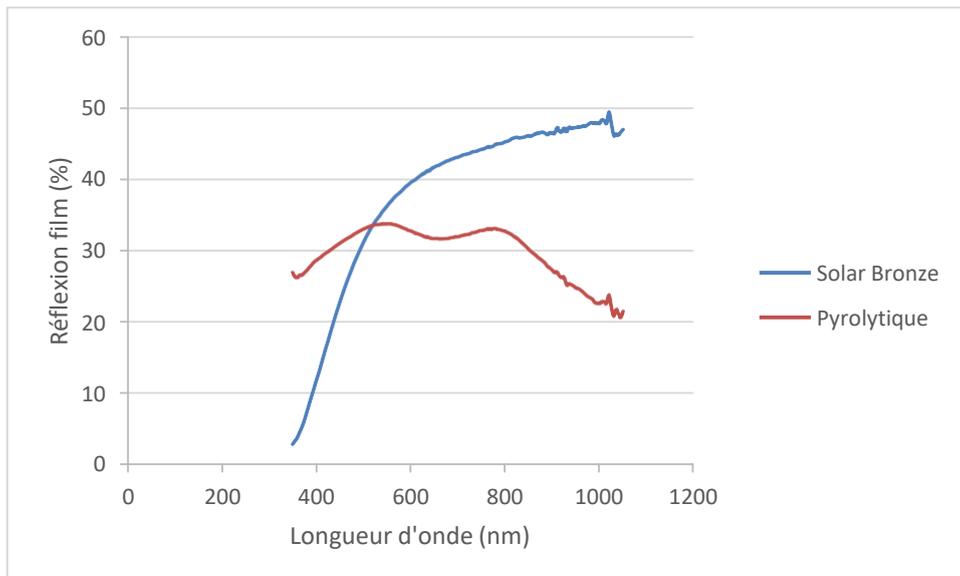


Figure IV.33 : Pourcentage de réflexion film en fonction de longueur d'onde avant test.

Interprétation

Les trois graphes précédents représentent la variation des caractéristiques optiques du verre on terme transmission, réflexion et absorption de la lumière pour le test de corrosion dans un intervalle de longueur d'onde fixe,

- 1^{er} graphe : une variation important du pourcentage de transmission pour le verre pyrolytique avec une diminution pour le deuxième,
- 2^{ème} graphe : on a une augmentation important pour le Solar bronze, et variation pas stable pour le pyrolytique,

- 3^{ème} graphe : augmentation très important pour le Solar bronze avec une diminution de pourcentage du pyrolytique,

- **Après 5 jours**

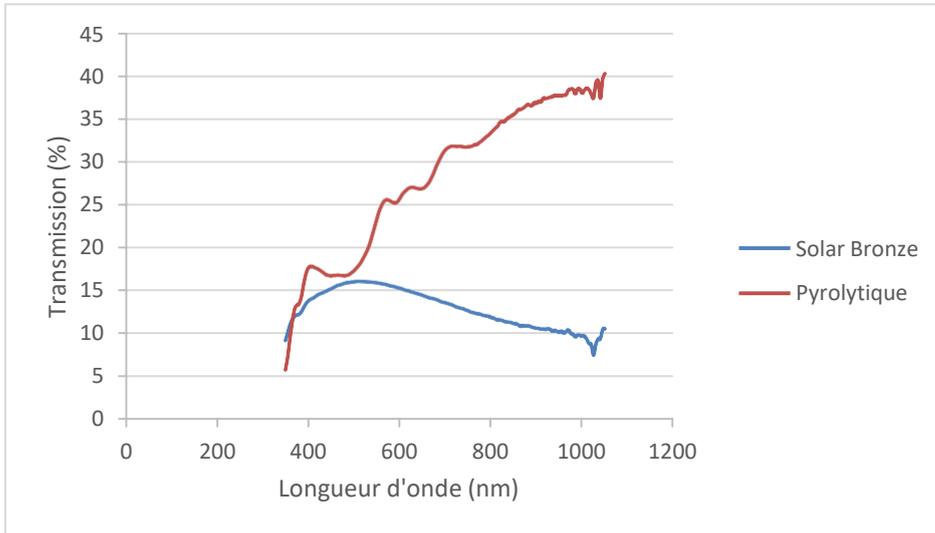


Figure IV.34 : Pourcentage de transmission après 5 jours en fonction de longueur d'onde.

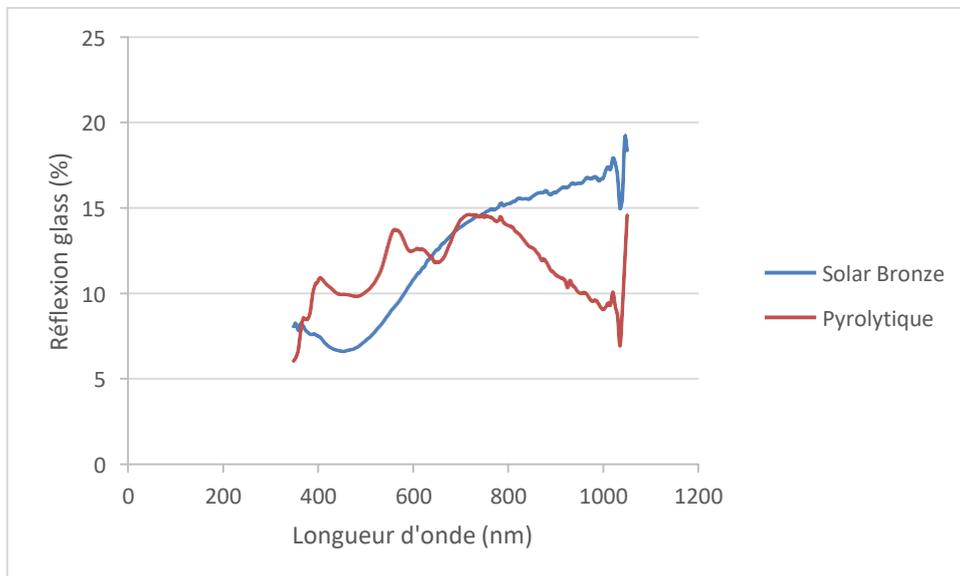


Figure IV.35 : Pourcentage de réflexion coté glass après 5 jours en fonction de longueur d'onde.

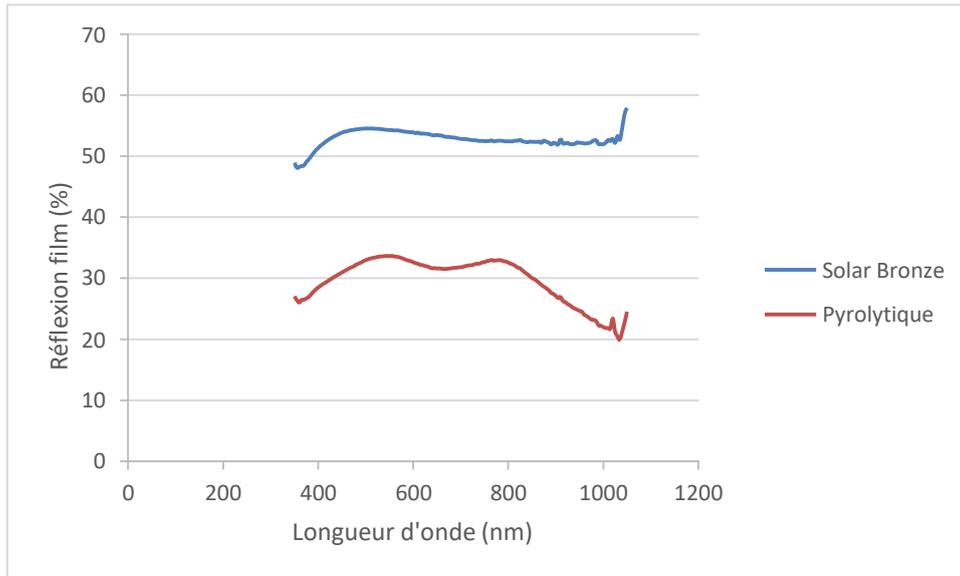


Figure IV.36 : Pourcentage de réflexion coté film après 5 jours en fonction de longueur d'onde.

Interprétation

- 1^{er} graphe : on remarque une augmentation très importante dans le pourcentage de transmission pour la pyrolytique, par contre une diminution du pourcentage du Solar bronze,
- 2^{ème} graphe : on voit une variation instable dans le pourcentage de réflexion glass pour les deux verres,
- 3^{ème} graphe : une légère variation (presque stable) dans la réflexion film du Solar bronze, avec une diminution progressive dans le pourcentage du pyrolytique,

- Après 21 jours

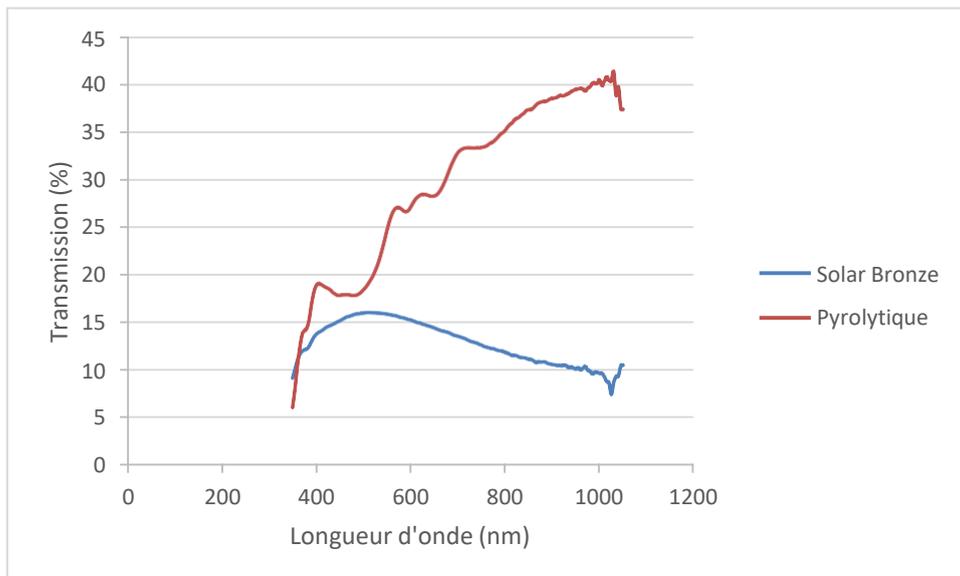


Figure IV.37 : Pourcentage de transmission après 21 jours en fonction de longueur d'onde.

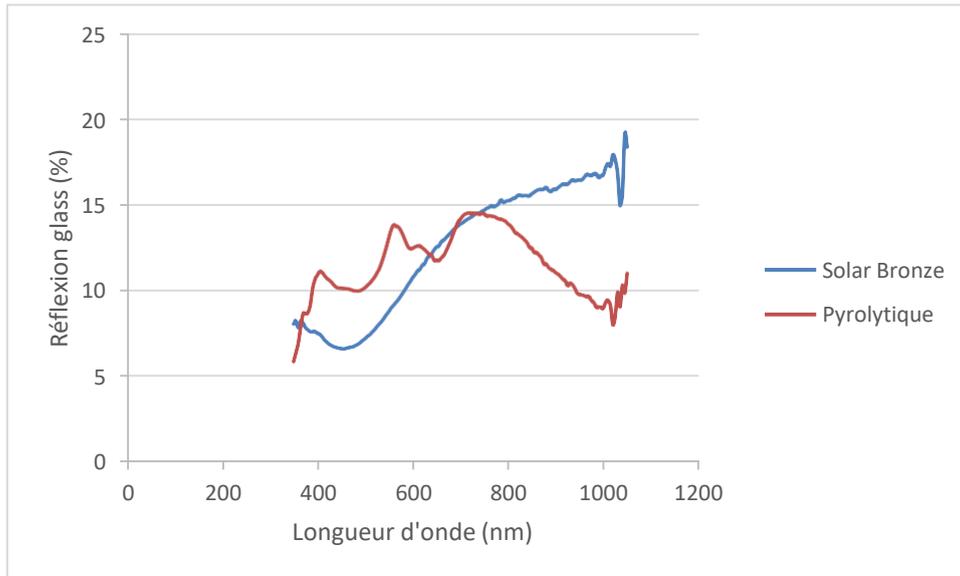


Figure IV.38 : Pourcentage de réflexion coté glass après 21 jours en fonction de longueur d'onde.

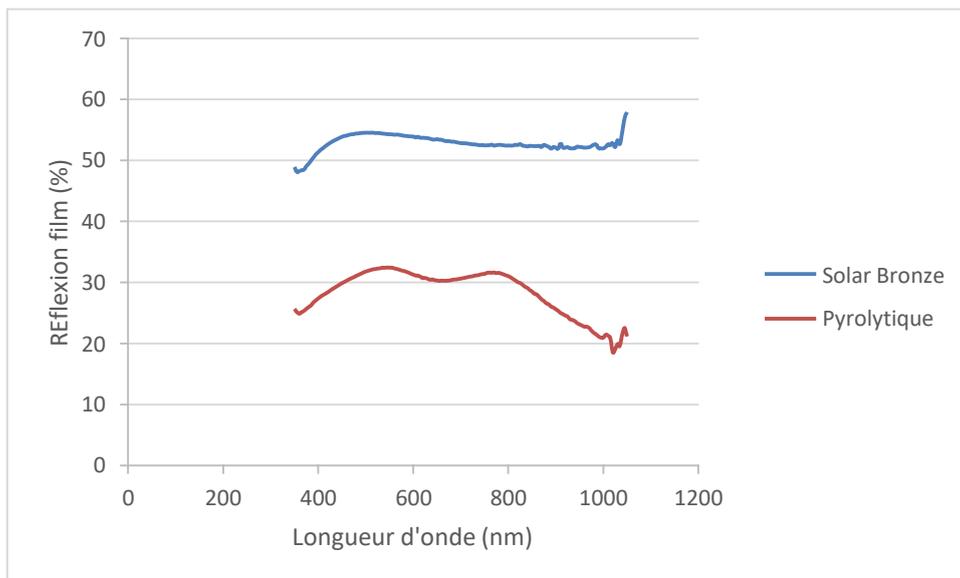


Figure IV.39 : Pourcentage de réflexion coté film après 21 jours en fonction de longueur d'onde.

Interprétation

- 1^{er} graphe : au début, a une valeur minimale de longueur d'onde, Les valeurs de transmissions sont proches pour les deux verres, Après l'augmentation de la valeur de longueur d'onde la courbe du pyrolytique a une augmentation importante, Par contre, celle du Solar bronze se diminue,
La valeur du pourcentage de transmission du pyrolytique est la même qu'avant le test mais celle du Solar bronze s'a changée avec une petite valeur,
- 2^{ème} graphe : la réflexion du Solar bronze s'est augmentée avec une très petite valeur,
- 3^{ème} graphe : la même observation que le graphe de réflexion film après 5 jours,
La réflexion film du Solar bronze presque se stabilise à une valeur de pourcentage,

Conclusion

- Le verre pyrolytique a une meilleure absorption de la lumière,
- Le verre Solar bronze à une réflexion importante,

Après le test on a fait passer les échantillons par un microscope optique pour savoir si les résultats sont dus au corrosion ou non,

III.2.1. Observation microscopique après test de corrosion

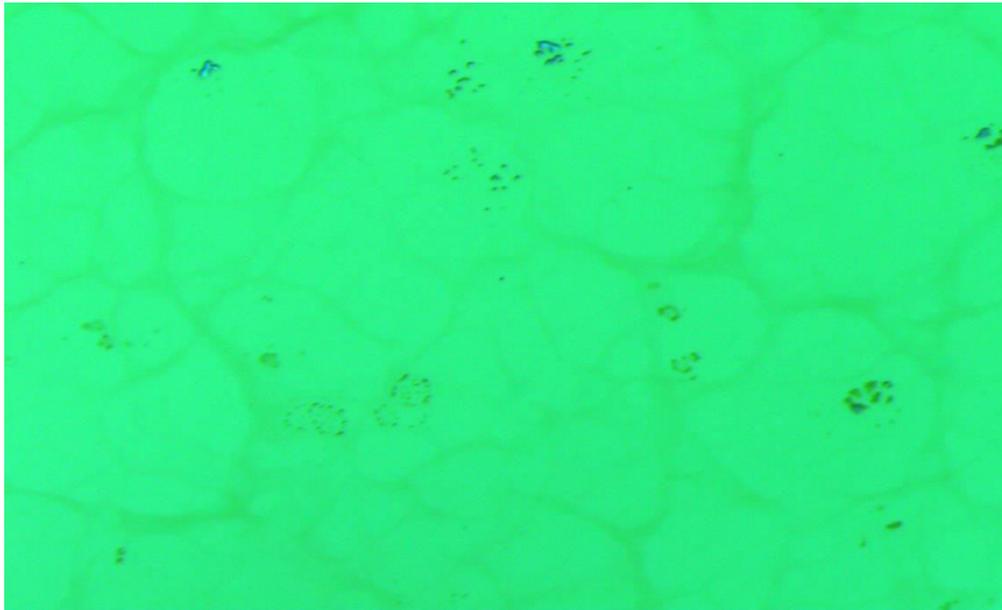


Figure IV.40 : Micrographie de l'échantillon Solar Bronze 20.

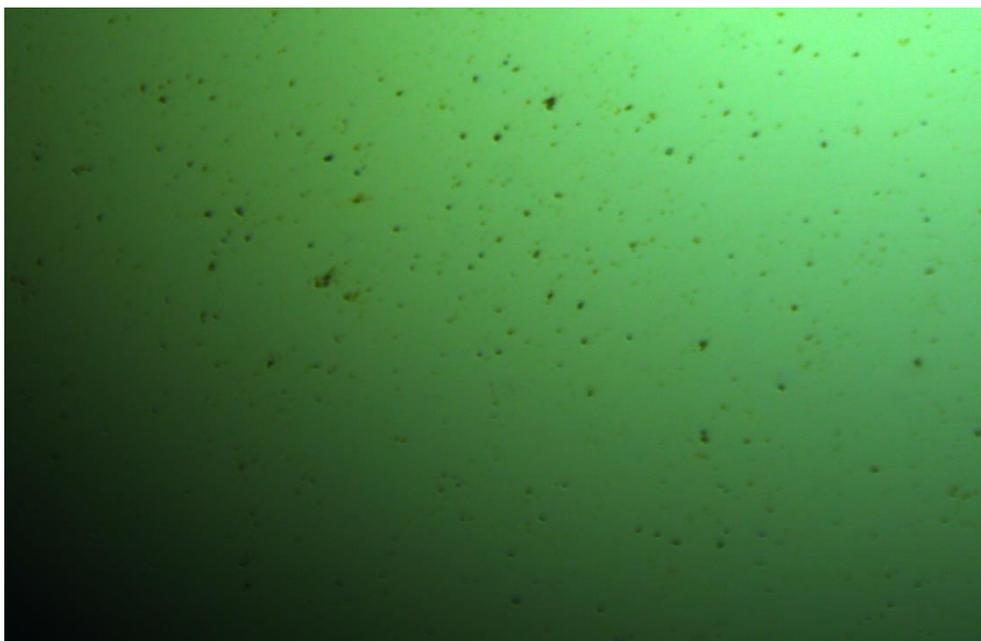


Figure IV.41 : Micrographie de l'échantillon Pyrolytique.

- Pour le verre Solar bronze : pas de points de corrosion dans le côté glass,
- Pour le verre pyrolytique :
 - Les points au côté glass sont causés par la pulvérisation normale,
 - Et pour le côté film sont causés par la corrosion qui est dû à la poudre intercalaire qui nous donne ces points avec la durée de stockage,

III.3. Test de durabilité chimique accélérée (test d'immersion)

Résultats du test d'immersion dans les tableaux suivants :

Tableau IV.15 : Résultats test d'immersion pour l'échantillon I

	Identification du produit	Identification supplémentaire	Y	L*	a*	b*	dE	
Solar Bronze 20	Avant immersion	Transmission	20,92	52,86	-3,05	-4,06		
	Non traitée		20,99	52,94	-3,04	-4,02		
	Traitée avec H ₂ SO ₄		21,01	52,96	-3,08	-3,88		
			Ecart	0,009	0,1	-0,03	0,18	0,20808652
	Avant immersion	Réflexion glass	11,89	41,03	3,44	8,83		
	Non traitée		11,94	41,13	3,47	8,76		
	Traitée avec H ₂ SO ₄		11,75	40,82	3,56	8,94		
			Ecart	-0,14	-0,21	0,12	0,11	0,26570661
	Avant immersion	Réflexion film	36,33	66,77	-1,2	18,55		
	Non traitée		36,04	66,55	-1,14	19,13		
	Traitée avec H ₂ SO ₄		36,21	66,68	-1,17	18,9		
			Ecart	-0,12	-0,09	0,03	0,35	0,36262929

Interprétation :

La comparaison des résultats avant et après le test d'immersion montre qu'il y a une faible différence dans les valeurs des indices optiques de la transmission, réflexion glass et réflexion film. Les valeurs de De <2 selon la norme de l'entreprise MFG. Alors ce verre est conforme.

Tableau IV.16 : Résultats test d'immersion pour l'échantillon 2.

Pyrolytique	Identification du produit	Identification supplémentaire	Y	L*	a*	b*	dE
	Avant immersion	Transmission	55,06	4,6	11,06	22,99	
	Non traitée		55,93	4,65	11,5	23,84	
		Ecart	-0,87	-0,05	-0,44	-0,85	0,97621719
	Avant immersion	Réflexion glass	41,93	0,42	6,1	12,45	
	Non traitée		40,76	0,23	5,65	11,72	
		Ecart	1,17	0,19	0,45	0,73	1,2679
	Avant immersion	Réflexion film	64,02	-2,46	3,77	32,83	
	Non traitée		63,37	-2,66	2,09	32,03	
		Ecart	0,65	0,2	1,68	0,8	1,81242931

Interprétation

Les résultats avant et après le test d'immersion montrent que les indices optiques ont changé, mais restent dans l'intervalle d'acceptation.

D'après la norme de l'entreprise MFG, la limite d'acceptation est de $De < 2$. Alors notre verre est conforme.

III.4. Test de colorimétrie

Résultat du test de colorimétrie est présenté au tableau suivant :

Tableau IV.17 : Résultats test colorimétrie avant et après pour l'échantillon 1.

		Y	L	a	B
Avant UV	T	20,57	52,47	-3,28	-3,47
	R _G	11,95	41,14	3,62	9,88
	R _F	36,78	67,11	-1,19	19,38
Après UV	T	20,75	52,68	-3,25	-3,60
	R _G	12,24	41,60	3,54	9,87
	R _F	37,10	67,35	-1,19	18,79

Tableau IV.18 : Résultats test colorimétrie avant et après pour l'échantillon 2.

		Y	L	a	B
Avant UV	T	22,13	54,16	4,36	11,74
	R _G	12,43	41,89	0,32	6,90
	R _F	33,26	64,37	-2,27	4,02
Après UV	T	22,13	54,16	4,38	11,81
	R _G	12,40	41,84	0,34	6,95
	R _F	33,33	64,43	-2,28	3,84

Interprétation

Après avoir réalisé le test colorimétrie sur nos échantillons UV (Solar Bronze 20, Pyrolytique) on a remarqué que :

- Les indices optiques ont légèrement changé tout en restant dans l'intervalle d'acceptation.
- Aucun signe de dégradation ni changement de couleur na était observé. Ce qui signifie que ces couches déposées résistent aux rayonnements à grand intensité (UV).

III.5. Test de trempe thermique

- Avant le test de trempe

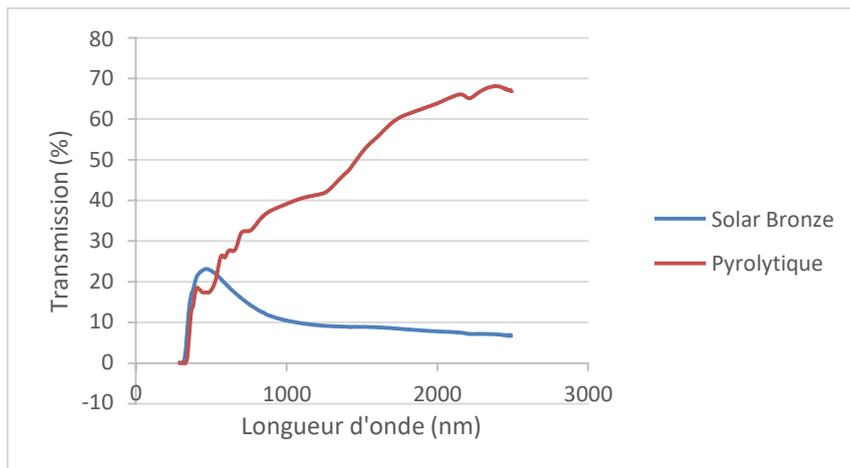


Figure IV.42 : Pourcentage de transmission en fonction de longueur d'onde avant trempe.

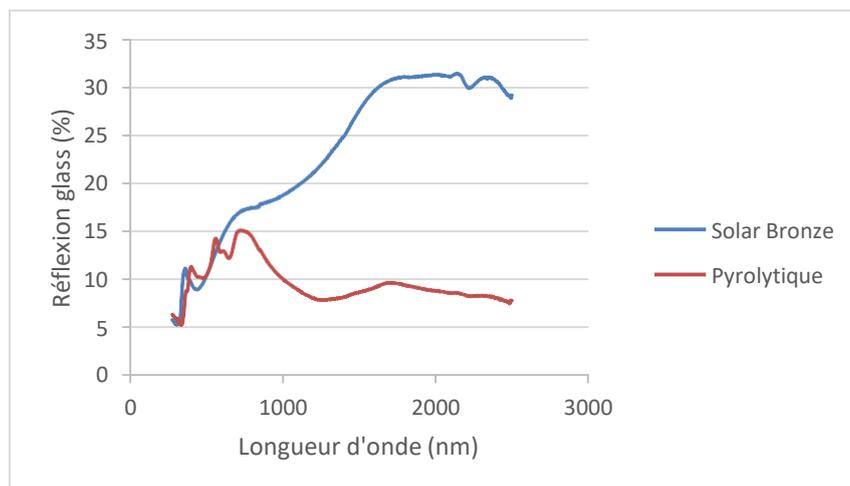


Figure IV.43 : Pourcentage de réflexion coté glass en fonction de longueur d'onde avant trempe.

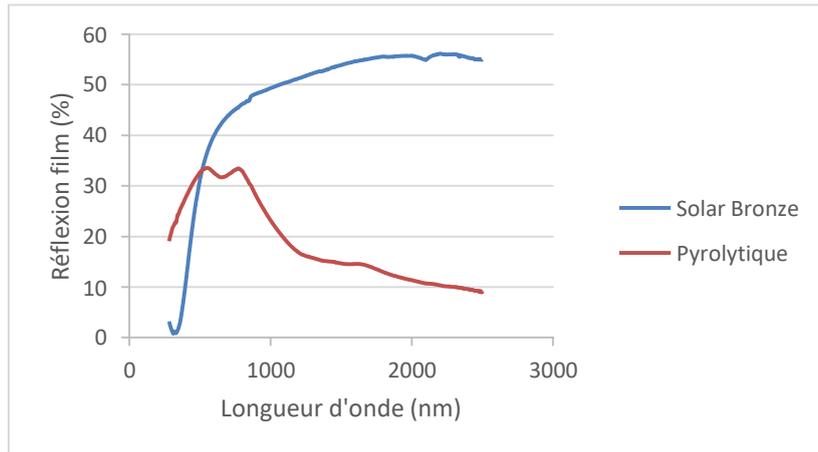


Figure IV.44 : Pourcentage de réflexion coté film en fonction de longueur d'onde avant trempe.

Interprétation

Les trois graphes précédents représentent la variation des caractéristiques optiques du verre on terme transmission, réflexion et absorption de la lumière pour le test de trempe thermique dans un intervalle de longueur d'onde fixe,

- 1^{er} graphe : on voit une augmentation très importante dans le pourcentage de transmission du pyrolytique, par contre une diminution progressive pour le Solar bronze,
- 2^{ème} et 3^{ème} graphe : on remarque qu'il y a une augmentation importante dans le pourcentage de réflexion (film et glass) du Solar bronze avec une diminution pour le pyrolytique.

- Après 16 min de trempe

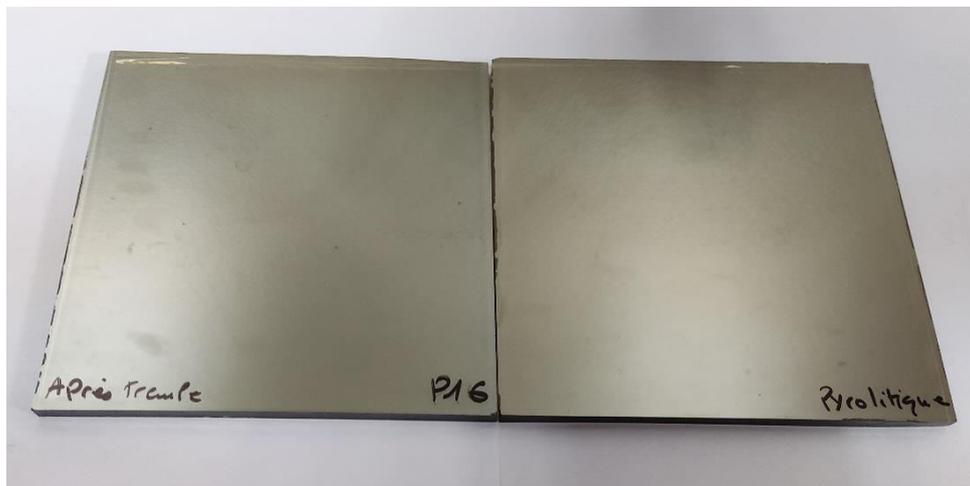


Figure IV.45 : Le côté film de l'échantillon 2 après 16 min de trempe.



Figure IV.46 : Le côté glass de l'échantillon 2 après 16 min de trempe.

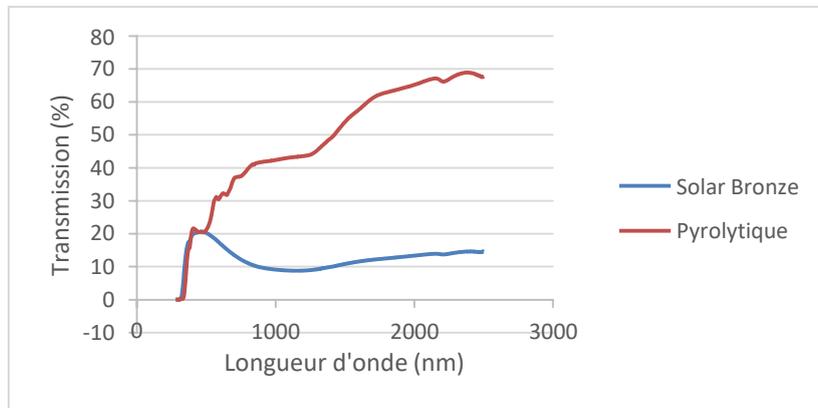


Figure IV.47 : Pourcentage de transmission en fonction de longueur d'onde après trempe.

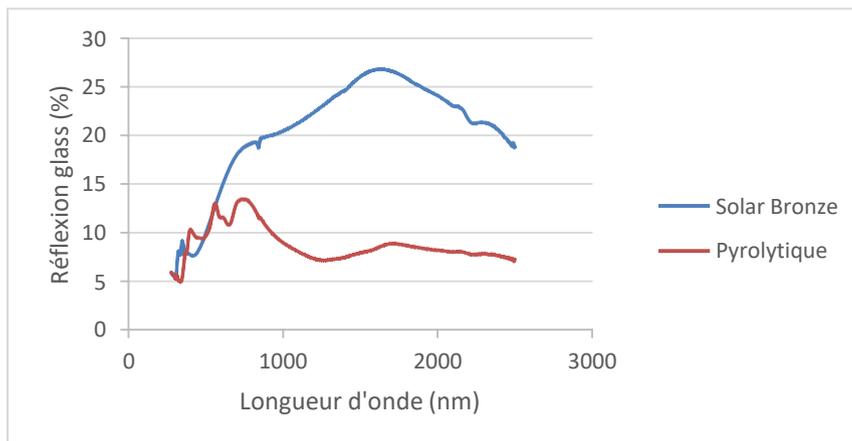


Figure IV.48 : Pourcentage de réflexion côté glass en fonction de longueur d'onde après trempe.

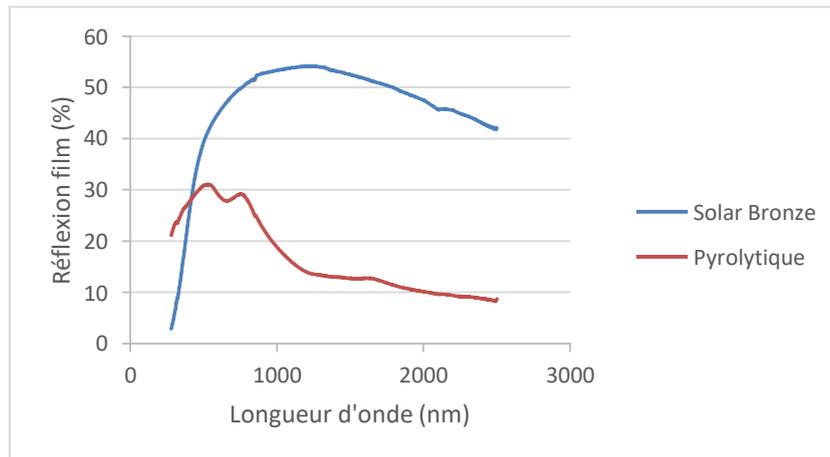


Figure IV.49 : Pourcentage de réflexion côté film en fonction de longueur d'onde après trempe.

Interprétation

- 1^{er} graphe : il n'y a pas de changement dans l'évaluation des courbes du pyrolytique,
- 2^{ème} graphe : on a une diminution dans le pourcentage de réflexion glass du Solar bronze après la trempe avec fixation pour celle du pyrolytique,
- 3^{ème} graphe : diminution du pourcentage de réflexion film du Solar bronze avec une fixation du pyrolytique,

Conclusion

- La trempe a causé une diminution de la performance du pyrolytique (diminution du pourcentage de la réflexion glass),
- Le Solar bronze se trempe dans 16 min,
- Les valeurs du pyrolytique sont stable puisqu'il est déjà dur (ne se trempe pas dans 16 min).
- Comme le pyrolytique n'a pas être trempé à 16 min on a essai dans 18 min pour savoir ce qu'il va donner comme résultats.
- **18 min de trempe**



Figure IV.50 : Le côté film de l'échantillon 2 après 18 min de trempe.



Figure IV.51 : Le côté glass de l'échantillon 2 après 18 min de trempe.

- 16 et 18 min de trempe



Figure IV.52 : Le côté film de l'échantillon 2 après 16 et 18 min.



Figure IV.53 : Le côté glass de l'échantillon 2 après 16 et 18 min.

- Avant et après 18 min de trempe

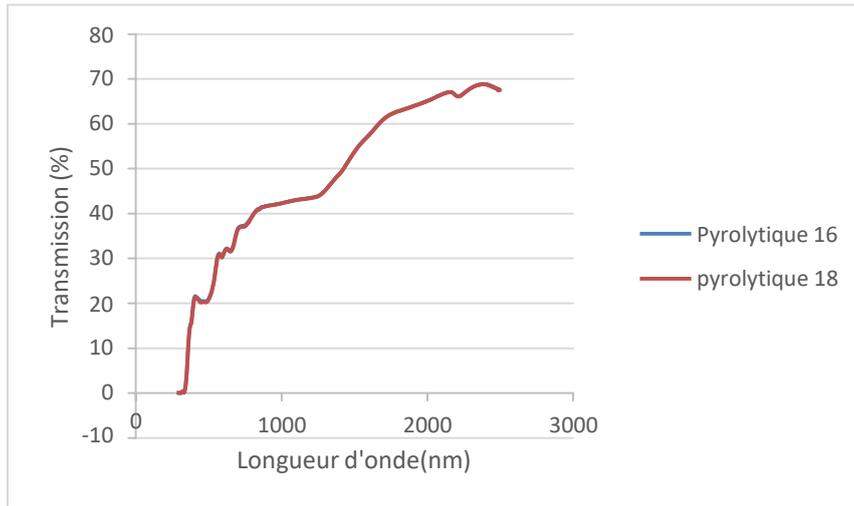


Figure IV.54 : Pourcentage de transmission avant et après trempe en fonction de longueur d'onde pour l'échantillon 2.

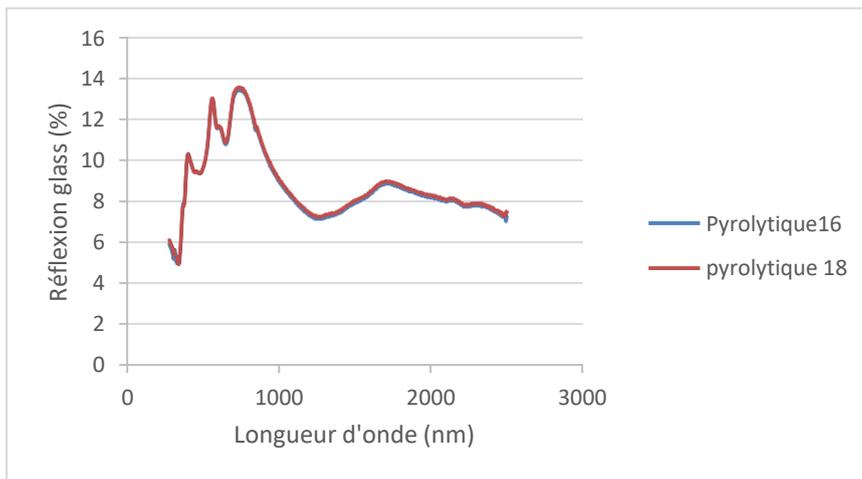


Figure IV.55 : Pourcentage de réflexion coté glass avant et après trempe en fonction de longueur d'onde pour l'échantillon 2.

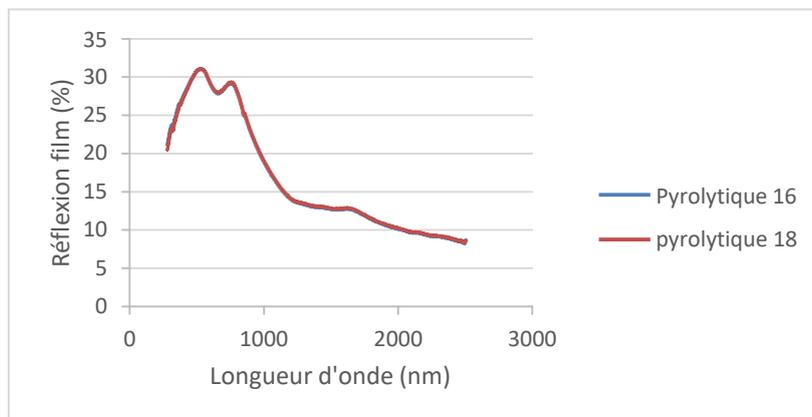


Figure IV.56 : Pourcentage de réflexion coté film avant et après trempe en fonction de longueur d'onde pour l'échantillon 2.

Interprétation

Les trois graphes précédents représentent la variation des caractéristiques optiques du verre pyrolytique on terme transmission, réflexion et absorption de la lumière pour le test de trempe thermique dans un intervalle de longueur d'onde fixe,

Pour les trois graphes on voit qu'il n'y a aucun changement dans l'évaluation des courbes entre le verre pyrolytique trempé 16 et 18 min et pour conclure, le verre pyrolytique est plus résistant à la trempe thermique par ce qu'il est plus rigide.

IV. Les analyses effectuées au niveau d'électroménager (trempe thermique)

IV.1. Test de fragmentation

Résultats du test de fragmentation dans le tableau suivant :

Tableau IV.19 : Résultats de test de fragmentation

Heur	Dimension (mm)	Résultat (nombre de fragments)	Observation
08 :00	631.78×392.07	112	conforme
10 :00	581.05×309.92	121	conforme
12 :00	581.07×360.03	98	conforme
14 :00	440.69×370.82	105	Conforme

Interprétation

D'après le test de fragmentation on observe que les valeurs du nombre de fragments sont proches.

Ce verre est conforme selon les normes de l'entreprise MFG.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de savoir les propriétés physico-chimiques de deux types de verre élaborés à MFG et AGC, par des tests de durabilité, de corrosion, de trempe, ainsi que leurs expositions aux radiations ultra-violettes.

Après l'étude comparative des verres : Solar Bronze 20 et Stop Sol Classic Bronze (Pyrolytique), on conclut qu'ils ont de bonne isolation thermique, résistance au test de vieillissement UV et de la durabilité.

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

- Assurer une bonne pulvérisation afin d'éviter les points de corrosions.
- Il est nécessaire de bien nettoyer le verre de la poudre intercalaire.
- La protection de la couche fonctionnelle soit avec du titane pure (Ti).
- S'assurer que la poudre intercalaire est sèche.
- Vérifier les outils de découpe périodiquement.
- Faire un étalonnage et un contrôle périodique des top-rollers.
- Contrôler le paramètre de création du vide périodiquement (doit être entre -2,-5).

Conclusion générale

Conclusion Générale

Ce projet de fin d'étude a été effectué en grande partie au niveau de la société verrière « Mediterranean Float Glass », qui nous a permis d'avoir une expérience pratique, une confrontation avec le monde du travail et de production. Ainsi que les problèmes et les difficultés quotidiennes de l'industrie verrière.

En effet, un travail pratique a été réalisé au sein de l'entreprise « Mediterranean Float Glass » depuis la matière première jusqu'au produit fini.

Le principal but de ce projet est d'étudier les propriétés physico-chimiques d'un verre à couches de l'entreprise MFG et de les comparer avec d'autres types de verre afin de proposer un produit de qualité et concurrentiel au niveau national et international pour l'entreprise MFG.

Pour cela, différents tests et différentes analyses ont été réalisés sur ce verre à couches et sa comparaison avec d'autres verres a été réalisée.

Les tests réalisés sont multiples, à savoir, la granulométrie, la densité, l'humidité, la colorimétrie, UV, la corrosion la trempe thermique et enfin le test Pummel pour identifier l'adhérence du PVB (Butyral Polyvinyle) avec le verre.

Il ressort, de ces résultats que le verre à couches pyrolytique (Nom commercial : **Stop Sol Classic Bronze**) est le meilleur et il pourra faire l'objet d'un produit de qualité répondant aux normes internationales et par conséquent, il pourra être commercialisé sans difficultés et sans contraintes.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

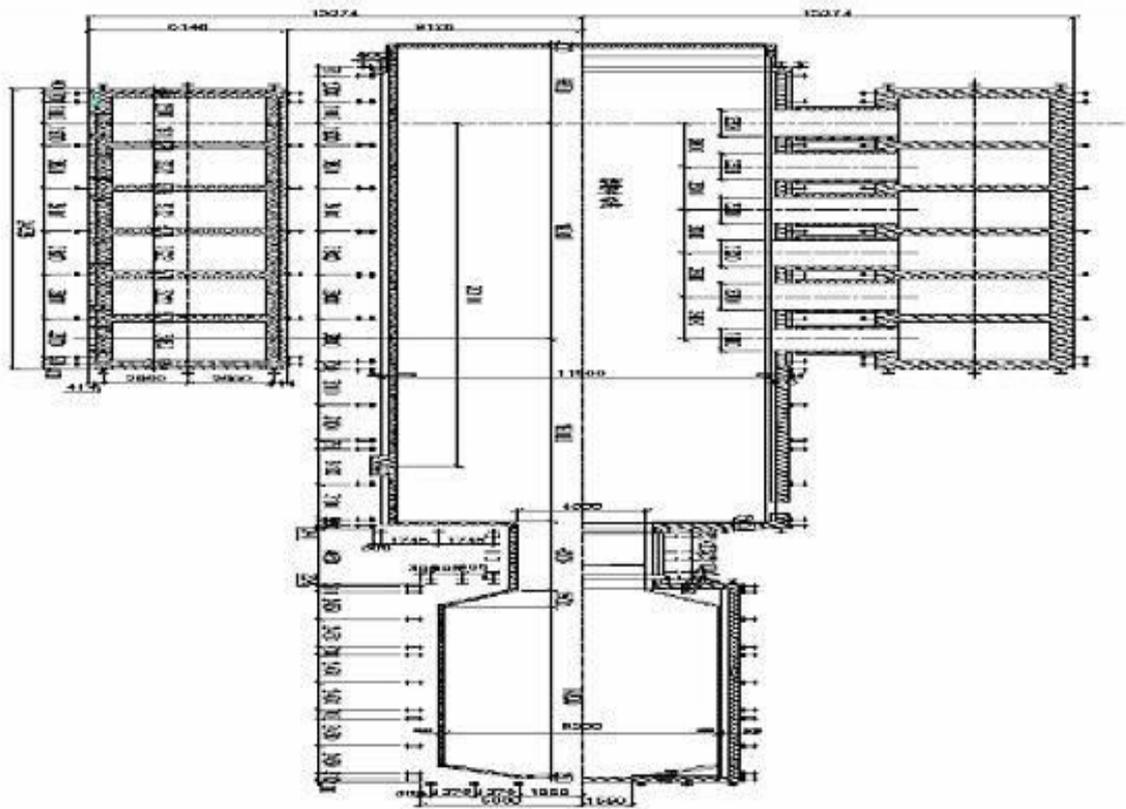
- [1] E. Damour, La chimie du verre, Paris & Liège, Librairie Polytechnique CH. Béranger, 1929
- [2] P. Gilard, Physico-chimie des silicates, Tome II : le verre, Edition-publicité-Impression-Soc. Bruxelles, 1947
- [3] H. Scholtze, Le verre : nature, structure et propriétés, 2^{ème} Edition, Institut du verre Paris, 1980
- [4] J. Zarzycki, Les verres et l'état vitreux, Edition Masson, Paris, 1982
- [5] J. Barton & C. Guillemet, Le verre : Science et Technologie, EDP Sciences, 2005
- [6] J.M. Haussonne, C. Cary, P. Browen et J. Barton, Traité des Matériaux, Vol. 16, Céramiques & Verres, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, CH-1015 Lausanne, 2005
- [7] D. R. Neuville, L. Cormier, D. Courant et L. Montagne, Du verre au Cristal : nucléation, croissance et démixtion, de la recherche aux applications, ecp-sciences, Chimie/Matériaux, 2013
- [8] S. Portal, « Corrosion de verres de silicate analyse texturale de la couche d'altération matière condensée », Université Montpellier II – Sciences et Techniques du Languedoc, 2001.
- [9] J. Grynberg, Thèse doctorat « Mécanismes physiques et chimiques mis en jeu lors de la fusion du mélange $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{CO}_3$ », Université Pierre et Marie Curie, 2012.
- [10] C. Maï, H. Satha, S. Etienne, J. Perez, Physical interpretation of creep and strain recovery of a glass ceramic near glass transition temperature, *Mechanics of Creep Brittle Materials-1*, Edited by A.C.F. Cocks and A.R.S. Ponter, Elsevier Applied Science, PP. 141-152, 1988
- [11] C. Maï, Satha & al, SAXS, WAXD and TEM of the early stages of crystallization in $\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2\text{-MgO-Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ Glass, *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 108, PP. 201-206, 1989
- [12] C. Maï, S. Etienne, H. Satha, J. Perez, Etude et analyse de la déformation non-élastique autour de la transition vitreuse d'un verre borosilicate, *Acta. Metall. Mater.*, Vol. 38, N°2, PP. 337-343, 1990
- [13] H. Satha, J. Simons, M. Remram, Alternative to lead crystal glass: study of a lead free composition, *Revue Verre*, Vol. 3, N°1, PP. 27-31, 1997
- [14] H. Satha, J. Simons, Effet de la composition sur l'indice de réfraction et la densité dans les verres de silice contenant Ba, Sr et Zn, *Ann. Chim. Sci. Mat.*, Vol. 27, N°2, PP. 53-59, 2002
- [15] H. Satha, J. Phalippou, Silica Glass from Aerosil by Sol-Gel Process: Densification and Textural Properties, *International Journal of Thermophysics*, Vol. 24, N°3, PP. 885-893, 2003
- [16] H. Satha, K. Atamnia, F. Despetis, Effect of Drying Processes on the Texture of Silica Gels, *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, Vol.4, PP. 17-21, 2013.
- [17] K. Atamnia, S. Satha, H. Satha, M. Gonon, Synthesis, structural and thermal characterization of silica glasses containing BaO, SrO and ZnO, *Mater. Res. Express* 8 (2021) 015201.
- [18] M. Gonon, S. Satha, H. Satha, T. Zanin, S. Abdelouhab, $\text{Sr}_2\text{TiSi}_2\text{O}_8$ (STS) Polar Glass-Ceramics: Effect of Na_2O and CaO Additions in the Parent Glass on the Crystallization Mechanism and on the Piezoelectric Properties, *Ceramics*, 2023, 6, 1-15.

- [19] K. Atamnia, H. Satha, M. Bououdina, Synthesis and characterisation of TiO₂ nanostructures for photocatalytic applications, *Int. J. Nanoparticles*, 2018, Vol. 10, No. 3, pp. 225-243
- [20] R. Boulmerka, Mémoire de fin d'étude « étude du rendement thermique (débit spécifique) de la 1^{er} ligne float et l'amélioration a apportée pour optimiser la consommation énergie du gaz », École Nationale Supérieure Des Mines et Métallurgie d'Annaba, Juin 2016.
- [21] H. zeroub et M. larbi, Mémoire de fin d'étude « le verre de bâtiment », Université M'hamed Bougara-Boumerdes, 2000.
- [22] A. Djeridi, Thèse de doctorat « Élaboration de matériaux à base de verres à réseau mixte pour la vitrification des déchets nucléaires », Université M'hamed Bougara Boumerdes, 2019.
- [23] N. Bensalem, Mémoire de fin d'étude, « Étude de l'influence de la température sur la qualité du verre Float », École Nationale Supérieure des Mines et Métallurgie d'Annaba, Juin 2016.
- [24] A. Litim et B. Drissi, Mémoire de fin d'étude, « Caractérisation et modélisation des verres multicouches », Ecole Nationale Supérieure des Mines et Métallurgie d'Annaba, Juillet 2017.
- [25] K. Belaidi, Mémoire de fin d'étude « Pulvérisation de matières chimiques sur le verre », Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2018
- [26] Y. Hafsi et S. Meftah, Mémoire de fin d'étude « Optimisation des paramètres de bain d'étain et l'étenderie pour améliorer le rendement lors de la production du verre mince 3mm », Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie Amar Laskri-Annaba, 2021.
- [27] H. Layachi, mémoire de master « étude et simulation numérique du processus d'autoclavage en verre feuilleté: prédiction des chocs thermique lors du traitement thermomécanique », Université M'hamed Bougara-Boumerdes, 2012.

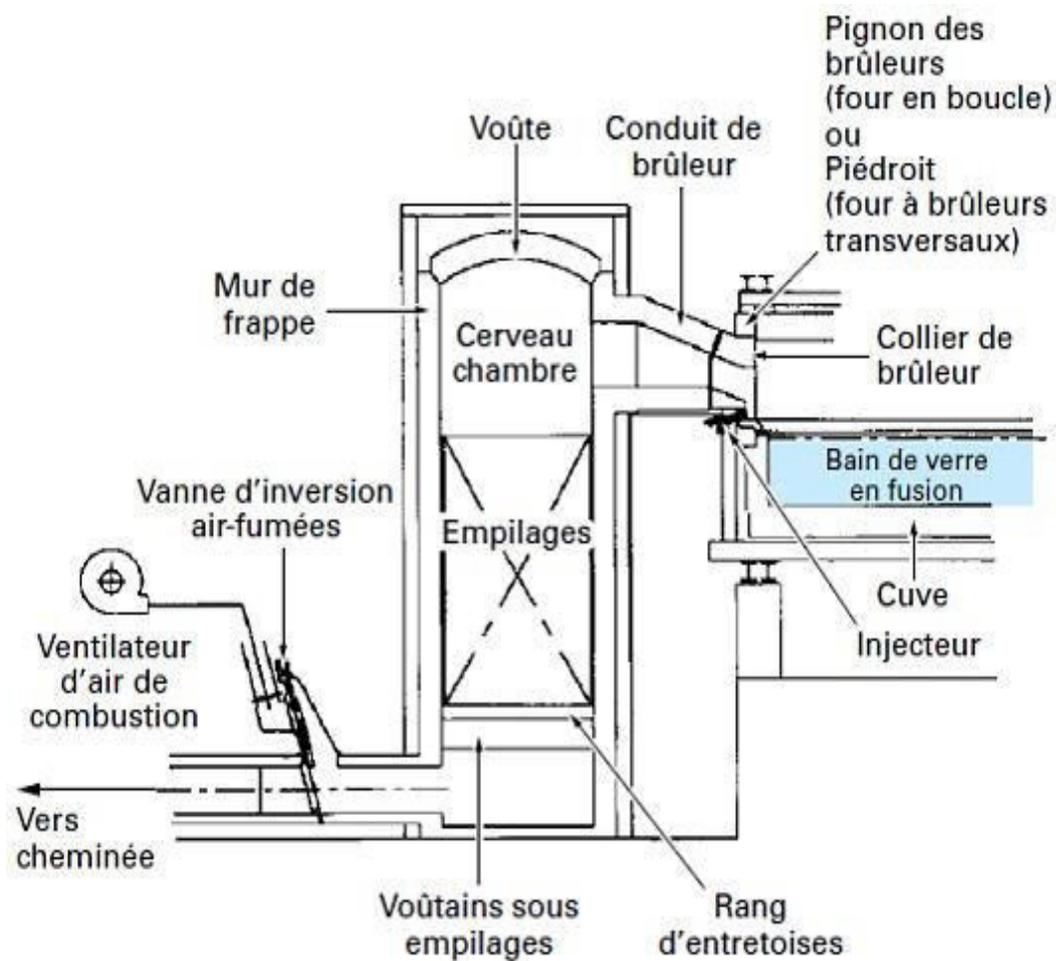
Les Annexes

ANNEXES :

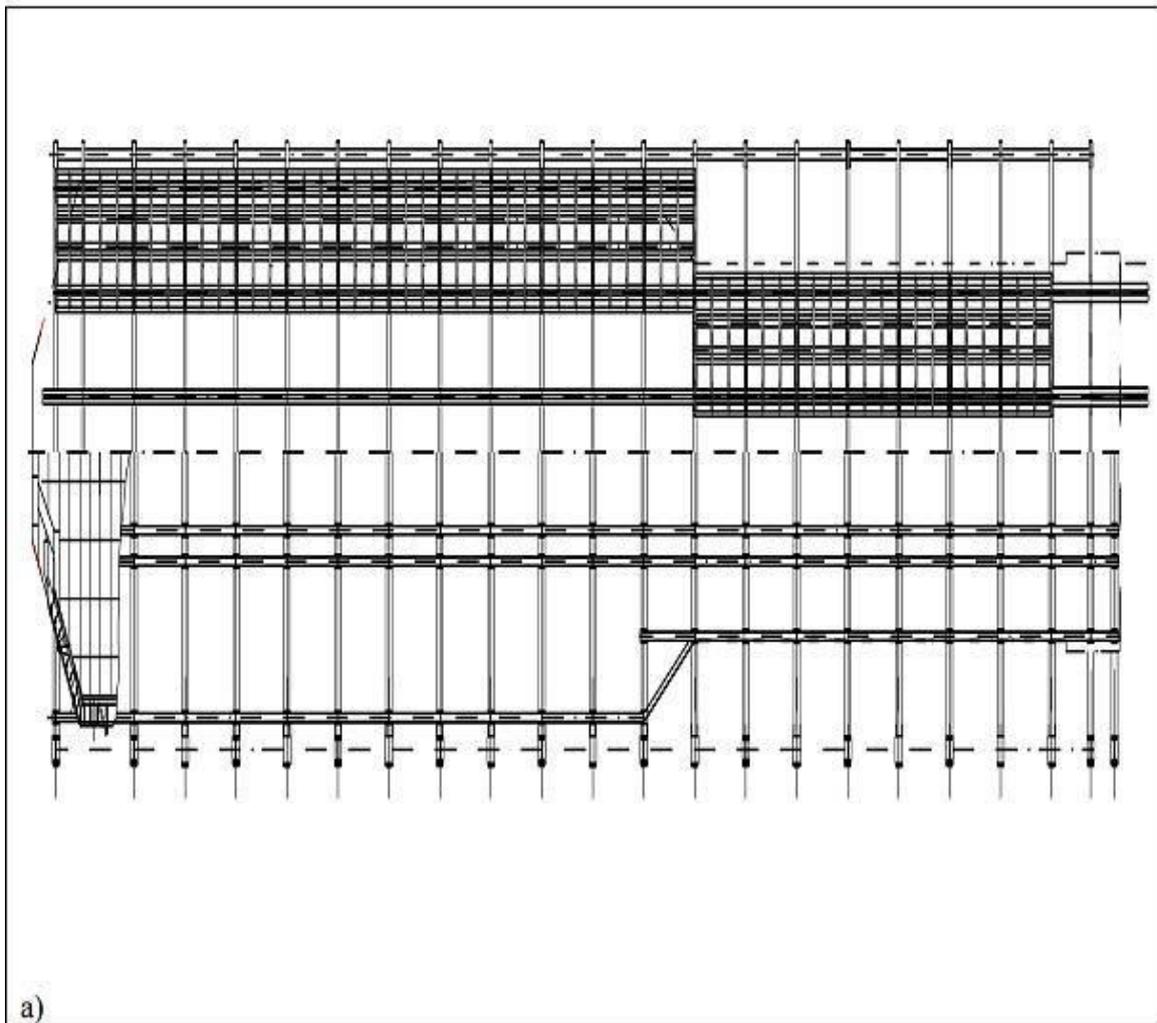
ANNEXE N°1 : Plan de dimension de four de fusion

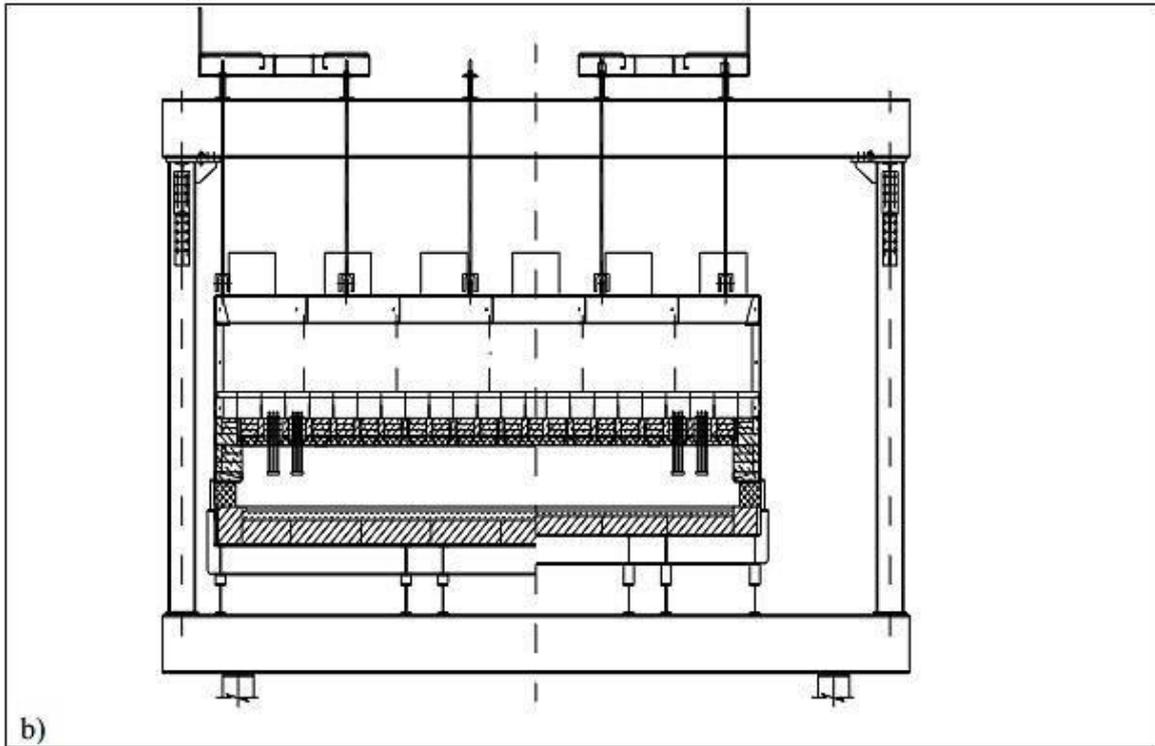


ANNEXES N°2 : Chambre de régénérateur

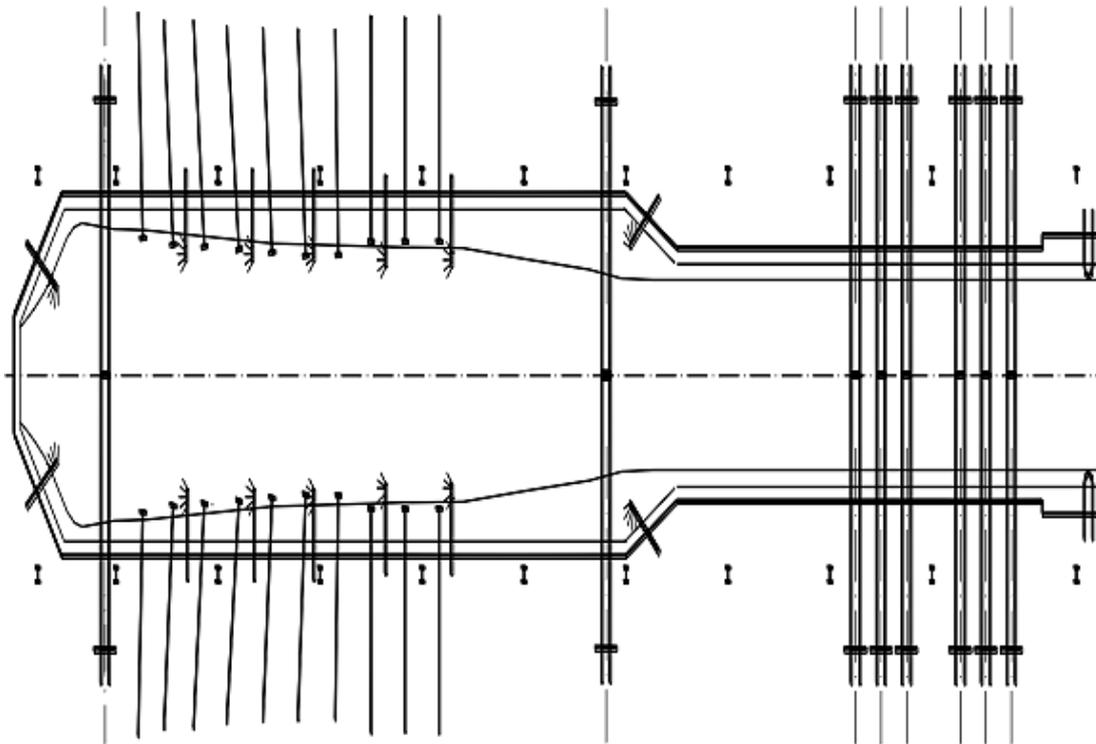


ANNEXE N°4 : La vue en plan (a) et la vue en coupe transversale (b) du bain d'étain.





ANNEXE N°5 : Disposition technologique du bain d'étain



Présentation de l'entreprise

Présentation de l'entreprise [1-2]

Mediterranean Float Glass (MFG SPA) est une filiale du groupe **CEVITAL**. Créée en 2007 est une filiale du groupe Cevital premier groupe industriel privé en Algérie, est le plus grand producteur de verre plat en Afrique, avec capacité de production de 600tonnes/jour, animée par des équipes de jeunes talents au service des acteurs du progrès et du développement.

MFG se classe aujourd'hui parmi les premiers producteurs africains de verre. Son siège social et son usine sont implantés à l'Arbâa, Wilaya de Blida, à 32 km du port d'Alger, sur une superficie de 30 hectares. MFG diversifie sa gamme, en lançant en 2009 une ligne du verre feuilleté d'une capacité de 400 tonnes/jour, et une usine de transformation des produits verriers, lancée début octobre 2010.

MFG s'est rapidement imposée dans le monde verrier, faisant passer l'Algérie, dès sa première année d'existence, du stade d'importateur de verre plat exclusif à celui d'exportateur. Tout en répondant à la demande locale dont elle couvre à plus de 90%, MFG exporte 70% de sa production essentiellement en Europe occidentale (Italie, Espagne, France, Portugal...). Mais aussi vers la Tunisie, le Maroc 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. L'activité d'export connaît à partir de 2017, avec le lancement d'une deuxième ligne float, un essor certain accompagné d'une extension sur d'autres destinations.

Orientée vers un axe majeur, le bâtiment, MFG compte aujourd'hui parmi les leaders dans la production de verre plat en Afrique et l'unique au Maghreb.

L'entreprise s'est développée rapidement au cours de ces dix dernières années, son effectif est passé de 700 en 2010 à 900 en 2020.

Cinq autres lignes de production de verre ont été mises en place:

- 2009 ligne verre feuilleté 235T/J;
- 2010 ligne verre transformé, affiliée à ALSEV aujourd'hui;
- 2011 ligne verre à couches 6 millions m² ;
- 2016 ligne verre électroménager 9 millions de pièces/an, affiliée à ALSEV aujourd'hui.
- Le 28 mars 2016 MFG a inauguré la deuxième ligne float 800T/J, de plus avec la première ligne la production globale de verre float atteint les 1400T/J.

La vision de MFG:

MFG est le précurseur développant des produits verriers en Algérie ; le verre étant un produit incontournable et omniprésent au quotidien, il se présente dorénavant comme une solution moderne.

MFG révolutionne le marché Algérien à travers les innombrables choix d'applications qu'elle propose comme solution à ses clients, elle fait donc transiter le domaine du verre d'une utilisation rudimentaire vers les applications les plus avancées. Sa stratégie se traduit par une dynamique exemplaire et une longueur d'avance. De par son essor dans le domaine verrier, sa position sur le marché ainsi que la place importante qu'elle occupe dans le tissu industriel Algérien.

Distribution

La carte ci-dessous représente les réseaux de distribution de MFG vers l'étranger (Europe, Afrique) :

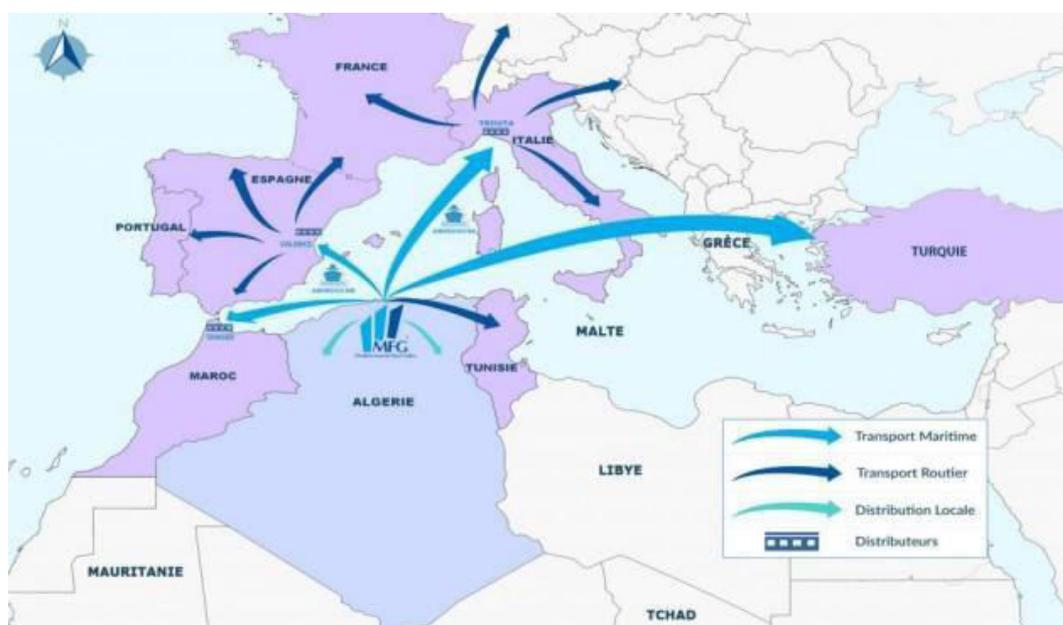


Figure 1 : Les réseaux de distribution de MFG

Au-delà d'une véritable proximité, le réseau de distribution de MFG assure la synergie des équipes pour garantir la qualité des réponses, le suivi des approvisionnements et la régularité des fabrications.

Le circuit de distribution de MFG Algérie se définit comme suit :

- ✦ **Vente directe** : pour les transformateurs (miroiteries, façadiers, double vitrage et aluminium, entreprise des bâtiments)
- ✦ **Vente indirecte** : pour les grossistes qui s'organisent en deux groupes (le 1^{er} groupe s'occupe des régions centre et sud et le 2^{ème} groupe des régions est et ouest)

Organigramme général de la société MFG:

Pour un meilleur fonctionnement, la société est structurée comme suit

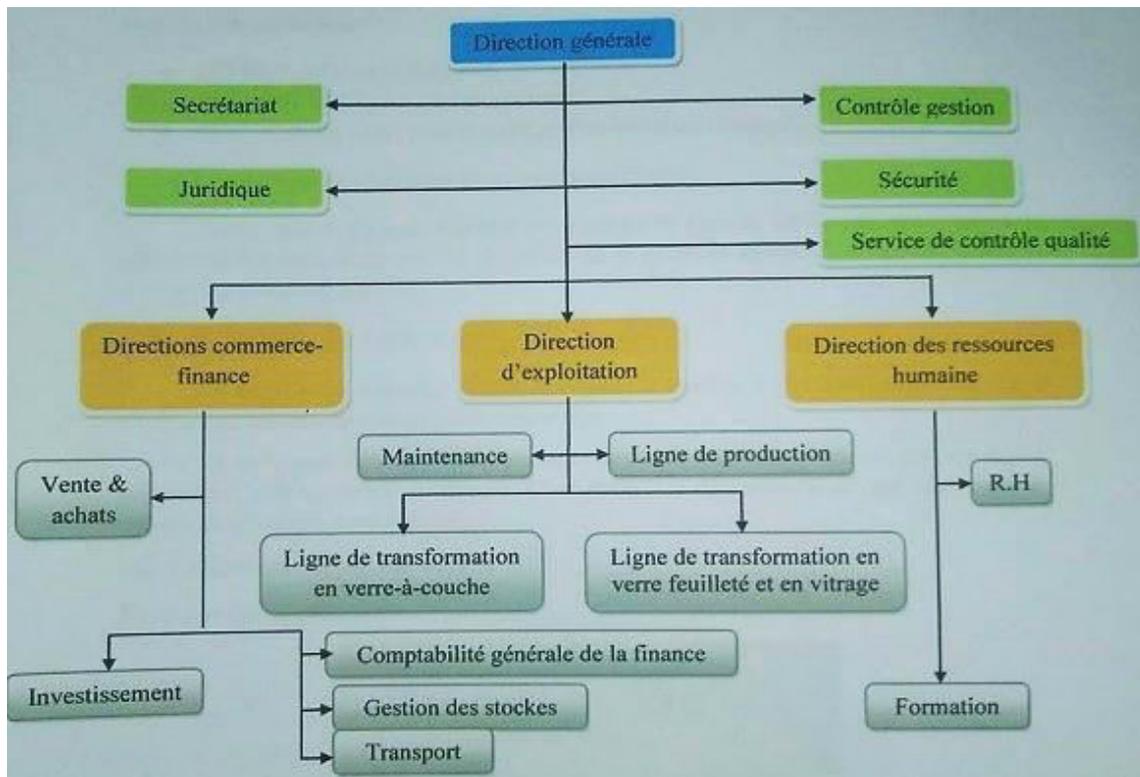


Figure 2 : Organigramme de l'entreprise MFG.

Références :

- [1] Le site officiel de l'entreprise MFG CEVITAL <http://www.mfg.dz>
- [2] Documentation interne « présentation de l'entreprise MFG CEVITAL ».