

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés



Mémoire

En vue de l'obtention d'un diplôme de

MASTER EN GENIE DES PROCEDES

Spécialité : Génie des Procédés des Matériaux

Intitulé du mémoire

**Elaboration et Caractérisation d'un verre plat coloré «Float
Glass MFG Algérie ».**

Présenté par :

TEBIB Aicha Manal

HAMMADI Khouloud

Encadré par :

Dr. S. BOUMAD

Juin 2024

ملخص

خصصت هذه الأطروحة لتطوير وتوصيف الزجاج المسطح الملون لأول مرة في الجزائر ضمن الشركة الجزائرية MFG. تم صناعة نوعين من الزجاج بطريقة الطفو، زجاج شفاف لأغراض المقارنة، و زجاج ملون بالاخضر باللعب على محتوى أكسيد الحديد Fe_2O_3 وهو الأكسيد المسؤول عن التلون. تمت إضافة كميات مختلفة من Fe_2O_3 لتحسين النسب المناسبة لتجنب العيوب البصرية التي يمكن أن تتشكل أثناء تصنيع هذا النوع من الزجاج وتتبع أسبابها. تم استخدام تقنيات مختلفة لتوصيف هذا النوع من الزجاج مثل: التحليل بواسطة مقياس الطيف الضوئي (LAMBDA 1050) ، ومضان الأشعة السينية، والمجهر الضوئي مما يسمح لنا بملاحظة أنواع العيوب البصرية في الزجاج المنتج. أظهرت النتائج المختلفة أن المنتج النهائي به عيوب بصرية والتي لا تزال موضوع البحث.

الكلمات المفتاحية: الزجاج المسطح، الزجاج المسطح الملون، أكسيد الحديد، العيوب البصرية، الخصائص الفيزيو-كيميائية.

Abstract

This study is devoted to the elaboration and characterization of a colored flat glass for the first time in Algeria within the Algerian company MFG. Two glasses were prepared by the float method, clear glass for comparative purposes, and colored by changing the content of the iron oxide Fe_2O_3 , being the one responsible for the coloring effect. Different quantities of Fe_2O_3 were added to optimize the adequate proportions in order to avoid optical defects that can form during the elaboration of this type of glass and trace their causes. Different techniques have been used to characterize this type of glass such as: analysis by spectrophotometer (LAMBDA 1050), X-ray fluorescence and the optical microscope which allows to observe the types of optical defects in the glass produced. The various results have shown that the final product obtained has optical defects in which the causes are still the subject of research.

Keywords: float glass, colored flat glass, iron oxide, optical defects, physico-chemical characterization

Résumé

Le présent mémoire est consacré à l'élaboration et la caractérisation d'un verre plat coloré pour la première fois en Algérie au sein de l'entreprise algérienne MFG. Deux verres ont été préparés par la méthode float, verre clair pour un but comparatif, et coloré en jouant sur la teneur de l'oxyde du fer Fe_2O_3 en étant l'oxyde responsable de la coloration. Différents quantités de Fe_2O_3 ont été ajoutées pour optimiser les proportions adéquates afin d'éviter les défauts optiques qui peuvent se former lors de la fabrication de ce type de verre et remonter à leurs causes. Différents techniques ont été exploitées pour caractériser ce type du verre telles que : l'analyse par spectrophotomètre (LAMBDA 1050), fluorescence X et le microscope optique qui nous permet d'observer les types des défauts optiques du verre élaboré. Les différents résultats ont été montrés que le produit fini possède des défauts optiques qui font toujours l'objet de recherches.

Mots clés : verre float, verre plat coloré, oxyde de fer, défauts optiques.

REMERCIEMENT

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

Nous tenons à saisir cette occasion et adresser nous profonds remerciements et nos profondes reconnaissances à notre promotrice *Dr. S. BOUMAD*, pour sa disponibilité et ses conseils.

Nous tenons aussi à remercier notre Co-promoteur *Mr. Hamou RENNAI*, le chef de la ligne (1) 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 souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères à toute l'équipe du laboratoire central et l'équipe de production MFG, pour leur accueil, pour répondre à nos questions et de fournir les explications nécessaires.

Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté de juger, d'évaluer notre mémoire, et de nous faire part de leurs précieuses remarques.

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

MERCI

Aïcha & Khouloud

DEDICACE

Louange à Dieu seul.

Ce travail est dédié spécialement

À nos chères mamans et papas pour leur patience, leur amour et leurs sacrifices.

Aucune dédicace ne peut exprimer notre respect.

A nos chers frères et sœurs, que Dieu vous garde pour nous.

À nos amis, collègues, professeurs et à ceux qui nous ont aidés un jour, que Dieu vous paye pour tous vos bienfaits.

Enfin, à tous ceux que nous aimons et qui nous aiment, nous dédions ce mémoire.

Aïcha & Khouloud

TABLE DES MATIERES

RESUME

REMERCIEMENT

TABLE DES MATIERES.....	5
I. CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
I.1 Historique du verre	3
I.2 Définition du verre.....	4
I.3 Structure du verre	4
I.4 Les propriétés de verre.....	5
I.4.1 Propriétés physiques.....	5
I.4.2 Propriétés thermiques	6
I.4.3 Propriétés chimiques	6
I.5 Classification des différents types de verre	6
I.5.1 Selon la composition chimique	7
I.5.2 Selon format de produit.....	8
I.6 Verre plat	9
I.7 Coloration de verre	10
I.7.1 But de coloration	10
I.7.2 Différents classes de coloration du verre	10
I.8 Composition et matières premières	12
I.8.1 Traitement du sable	12
I.8.2 Composition chimique de verre et préparation de mélange.....	13
I.9 Four.....	15
I.9.1 Enfournement	16
I.9.2 Fusion	16
I.10 Bain d'étain	16
I.11 Zone de refroidissement	16

I.12	Système de découpe.....	17
II.	CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES.....	20
II.1	Introduction.....	20
II.2	Echantillonnage, préparation et caractérisation de matière première :.....	20
II.3	Composition et méthode de préparation du verre plat clair.....	21
II.4	Composition et réparation du mélange du verre colore.....	22
II.5	Effet de changement de la quantité de l'oxyde de fer sur la composition total du verre 23	
II.6	Caractérisation du vert coloré.....	23
II.6.1	Analyse par Spectrophotomètre	23
II.6.2	Microscope optique	25
II.6.3	Fluorescence X.....	26
III.	CHAPITRE III: RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	27
III.1	Verre élaboré	27
III.2	Caractérisations physico-chimiques	27
III.2.1	Pour la matière première	27
III.2.2	Caractéristiques granulométriques	28
III.3	Effet des changements de matière première de la chronologie des actions sur le verre élaboré.....	29
III.4	Les changements des températures dans le four.....	31
III.5	Caractérisation physico-chimique du verre élaboré	32
III.5.1	Contrôle de conformité.....	32
III.5.2	Analyse par spectroscopie de fluorescence X du verre élaboré.....	33
III.5.3	Analyse par spectrophotomètre L a b.....	36

CONCLUSION

APPENDICES

REFERENCES

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Exposition du verre float de la société MFG.....	4
Figure I.2 : Structure de verre	5
Figure I.3 : Types de verre selon la composition a) verre de plomb, b) de quarts c)flacon en verre sodocalcique,d) de vitrocéramique.....	8
Figure I.4 : Types de verre selon le format : a) fibre de verre, b) verre creux c) plat, (d): en tube	9
Figure I.5 : Verre coloré	10
Figure I.6 : Echantillons de verre colorent.....	11
Figure I.7 : Traitement du sable (MFG).....	12
Figure I.8 : Silo dolomie	13
Figure I.9 : Schéma de transport des matières premières au malaxeur	14
Figure I.10 : Malaxeur des matières premières	15
Figure I.11 : Schéma repr�santant les zones de four.....	15
Figure I.12 : a) Zone du bain d'étain et b) Top Rolls du bain d'étain.....	16
Figure I.13 : Couloir de refroidissement à rouleau (�tenderie).....	17
Figure I.14 : Découpage de verre plat.....	17
Figure I.15 : Stockage de verre plat (MFG).....	18
Figure II.1 : Spectrophotomètre (LAMBDA 1050).....	24
Figure II.2 : Espace colorimétrique du laboratoire Cie.....	25
Figure II.3 : Microscope optique.....	26
Figure II.4 : Spectrométrie de fluorescence X	26
Figure III.1 : Echantillons du verre a) coloré (vert nuance 1) et b) clair	27
Figure III.2 : Imagerie illustrant les bulles d'affinage par lumière latérale	32
Figure III.3 : Imagerie illustrant le test Zébra.....	33
Figure III.4 : Courbe d'évolution de la teneur d'oxyde de fer.....	35
Figure III.5 : Défauts tri optique fournie par le laboratoire central (MFG).....	36
Figure III.6 : Courbe de variation de ΔE	38

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Les différents minéraux utilisés avec la couleur correspondante.....	11
Tableau I.2 : Types des défauts.....	18
Tableau II.1 : Composition massique en matières premières pour la préparation du verre coloré.....	22
Tableau II.2 : Composition massique du verre coloré en différentes quantités d'oxyde de fer Fe ₂ O ₃	23
Tableau III.1 : La pureté des oxydes rentre dans la composition du verre.....	28
Tableau III.2 : Classification granulométrique de sulfate de soude	28
Tableau III.3 : Classification granulométrique de feldspath	28
Tableau III.4 : Classification granulométrique de carbonate de soude	28
Tableau III.5 : Classification granulométrique de dolomie	29
Tableau III.6 : Classification granulométrique du charbon.....	29
Tableau III.7 : Les changements de matière première et leurs actions respectives.....	29
Tableau III.8 : Changements des températures du four en fonction des jours de la production	31
Tableau III.9 : Compositions chimiques du verre clair obtenu par fluorescence X.....	33
Tableau III.10 : Compositions chimiques du verre coloré vert obtenus par fluorescence X	33
Tableau III.11 : Résultats optiques (L* a* b*)	37

LISTE DES ABREVIATIONS

MFG	Méditerranéen Float Glass
J-C	Jésus -Christ
AZS	Alumine Zirconium Silice

INTRODUCTION GENERALE

Le verre fait partie intégrante de notre quotidien. Ses utilisations sont nombreuses et en constante évolution. Le verre est probablement le matériau industriel le plus ancien connu de l'humanité. Il y a environ un siècle, la technologie du verre a abandonné les méthodes traditionnelles et s'est renouvelée en tant que sujet de recherche pour les physiciens du solide.

L'application innovante des matériaux en verre dans la décoration moderne améliore non seulement les matériaux de décoration du design moderne, brisant de nombreuses limitations des matériaux d'origine, mais ajoute également la sensation esthétique naturelle de la forme et de la couleur du matériau au verre moderne, qui peut répondre aux besoins des gens. Exigences de vie et esthétiques [1]. Concernant les propriétés du verre et les domaines dans lesquels il est utilisé dans le design, il apparaît que le verre est utilisé depuis des siècles, comme matériau de construction et comme élément de décoration intérieure. Il a été observé que les designers utilisent le verre avec admiration dans l'architecture, la décoration intérieure et la conception de produits. Il est aussi utilisé pour l'isolation thermique et phonique, pour sa durabilité, pour se protéger des rayons UV du soleil. Le verre est utilisé dans les espaces intérieurs tels que les escaliers, les sols, les plafonds, les revêtements muraux et les tables. En tant que produit, le verre est utilisé partout dans notre vie seule, ou bien en combinaison avec d'autres matériaux.

Afin d'utiliser le matériau verre utilisé dans tous les aspects de notre vie en termes de design, nous devons d'abord bien connaître le matériau et la méthode de production du matériau. La conception doit être réalisée en fonction des propriétés des matériaux. Connaître les propriétés du verre permettra aux designers de créer des produits plus performants. [2]

La fabrication du verre plat a pris une grande place dans l'industrie mondiale. Dans notre pays la société Méditerranéen Float Glass (MFG) filière du grand groupe CEVITAL est le leader dans ce domaine. Notre stage de fin d'étude s'est déroulé au niveau de la 1^{ère} ligne de production du verre flot colore a l'entreprise Méditerranéen Float Glass.

L'objectif principale de ce mémoire est de suivre le procédé de la fabrication du verre plat colore en passant par des analyses physico-chimiques sur la matière première jusqu'au produit fini.

Ce présent mémoire est constitué de trois chapitres principaux.

Une revue bibliographique représente des généralités sur le verre, sa composition, sa structure, et ses propriétés, avec un aperçu sur les méthodes d'élaboration du verre plat.

Les différents matériels et méthodes utilisées au niveau du laboratoire d'analyse du verre plat coloré sont ensuite traités.

L'ensemble des résultats obtenus sont analysés, discutés et commentés au dernier chapitre. Enfin, ces chapitres sont clôturés par une conclusion générale envisageant les perspectives pour la suite de ce travail.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I. CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Historique du verre

Le verre, l'un des matériaux les plus anciens de l'humanité, se trouve à l'état naturel dans certaines roches volcaniques ou météoriques. L'obsidienne a été utilisée par les civilisations préhispaniques du Pérou pour créer des artefacts, notamment des miroirs et des pointes de flèches, datant de l'année 2000 av. Jésus-Christ. Les débuts de la production de verre par l'homme remontent au Moyen-Orient (Phénicie, Assyrie, Mésopotamie, Égypte).

D'après les écrits de Pline l'Ancien, le verre aurait été accidentellement découvert près du delta du fleuve Belus. Des marchands phéniciens auraient par hasard mélangé du natron (carbonate de sodium utilisé pour préserver les momies) de leur marchandise avec le sable chaud d'un feu. Une réaction entre ces composés aurait occasionné la formation de perles de verre, découvertes le lendemain parmi les cendres [3].

Il est possible que la découverte du verre ait été associée à d'autres pratiques telles que la métallurgie (avec les scories vitreuses issues de la fusion des métaux) et la céramique (où l'on observe la vitrification de la surface des poteries).

Les premiers objets en verre connus comprennent des perles, des colliers et des figurines en pâte de verre, et datent d'environ 3000 av. J.-C. Les documents les plus anciens concernant le verre sont des tablettes mésopotamiennes en écriture cunéiforme décrivant des recettes pour fabriquer du verre ou de l'émail coloré (7^e siècle av. J.-C.), à partir de sable, d'un agent fondant (nitre ou natron d'Égypte), et d'additifs colorants [4].

Le début de l'industrie artisanale du verre qui correspondait à l'utilisation de soufflage se situe au début de notre 15^{ème} siècle. Au 17^{ème} siècle avec le développement des connaissances dans le domaine de l'optique, sont apparus les premiers instruments d'observations utilisant le verre (lunette télescope ...). L'industrie verrière pour la fabrication de bouteilles et de verres à vitres a commencé aux Etats Unis au début du 18^{ème} siècle. En 1879, Monsieur Thomas Edison a inventé l'ampoule incandescente qui a changé les vies des millions de personnes tout autour du monde. C'est une application typique qui n'est possible sans l'utilisation de verre qui lui seul satisfait les propriétés nécessaires pour le fonctionnement

: dureté, transparence, tenir le vide et résister aux températures élevées en même temps .Avec le progrès technologique, le champ d'application du verre n'a cessé de s'étendre surtout dans l'optique pour la fabrication des composants optiques tels que : les lentilles, les prismes, miroirs....etc. Son large spectre d'utilisation, la rendue indispensable dans des applications fines de haute précision. Pour cette raison il a été classé comme « matériau noble» par la communication scientifique [5].

I.2 Définition du verre

Le verre est un matériau solide transparent, homogène et cassant, il a une structure spécifique (aspect structural) : le verre est un solide non cristallin (amorphe) .Ce matériau est l'un des matériaux les plus utiles car il possède de nombreuses qualités et peut prendre de beaucoup de formes [6].



Figure I.1 : Exposition du verre float de la société MFG

I.3 Structure du verre

Le plus souvent, le verre est composé d'oxyde de silicium (silice SiO_2) et de fondants, principalement du sable. Scientifiquement, le verre est défini comme un matériau amorphe (c'est-à-dire non cristallin) présentant un phénomène de transition vitreuse. Le sable de quartz, le potassium et le calcaire génèrent le matériau naturel, perméable, doux et durable qu'est le verre.

Au niveau microscopique, le verre est un réseau tridimensionnel dans lequel un atome de silicium, Si, placé au centre d'un tétraèdre, est attaché à quatre atomes d'oxygène O.

La figure ci-dessous montre deux structures possibles de la silice. L'une est dite cristalline, l'autre amorphe (verre). Parmi les représentations a et b [7].

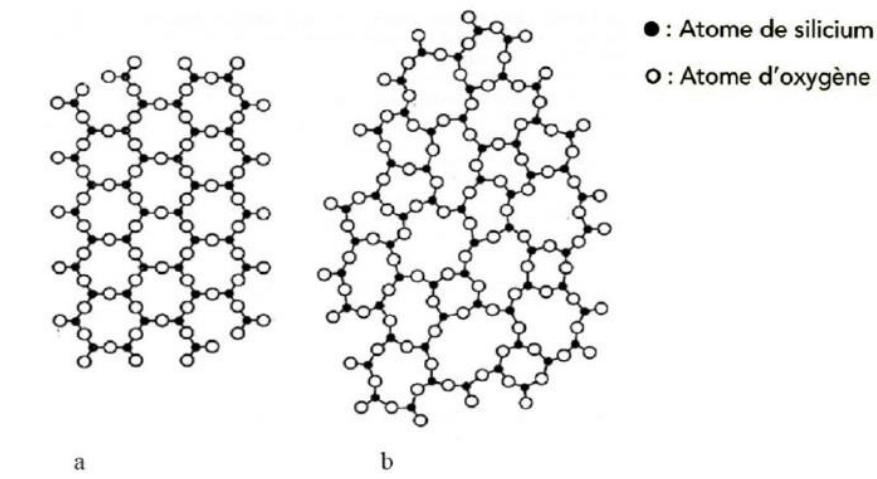


Figure I.2 : Structure de verre

I.4 Les propriétés de verre

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

I.4.1 Propriétés physiques

Le verre est souvent transparent, ce qui signifie qu'il permet le passage de la lumière. Cela en fait un matériau idéal pour les fenêtres, les lunettes et les lentilles optiques. La transparence du verre est due à sa structure amorphe, qui ne présente pas de motifs cristallins et la dureté du verre dépend du type de verre. En général, le verre est assez dur, mais il peut être rayé par des matériaux plus durs tels que le diamant. La dureté du verre est mesurée à l'aide de l'échelle de dureté de Brinell (BHN), où le verre a une valeur d'environ 1550 BHN. En plus la densité du verre fait référence à la quantité de masse contenue dans un volume donné de verre. Elle est généralement exprimée en kilogrammes par mètre cube (kg/m^3). La densité du verre de silicate, le type de verre le plus courant, est d'environ 2500 kg/m^3 . Cela signifie qu'un volume de verre pèse 2500 kilogrammes par mètre cube [8].

- La résistance et l'élasticité : la cassure du verre est liée à sa flexion et à sa résistance au choc. Il casse là où le métal se tord. Contrairement, sa résistance à la compression est importante : il faut une pression de 10 tonnes pour briser un centimètre cube de verre [9].

I.4.2 Propriétés thermiques

Les trois grandeurs qui caractérisent les propriétés thermiques du verre :

La dilatation : c'est un très mauvais conducteur de chaleur. Il se brise s'il subit un brusque changement de température car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas en même temps. Son coefficient de dilatation est faible, ce qui lui confère de nombreuses applications : il sert d'isolant thermique (laine de verre). On retrouve presque les mêmes coefficients que certains métaux d'où l'exécution de soudures verre-métal. Ce coefficient varie selon la composition.

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

Il est ininflammable et incombustible [9].

I.4.3 Propriétés chimiques

Le verre est un matériau présentant une très grande inertie chimique dont les propriétés sont :

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 ou se décolorent.

L'action des acides : ils 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].

I.5 Classification des différents types de verre

Il existe de nombreux types de verre qui peuvent être obtenus de différentes manières. Bien que chacun de ces types de verre présente des avantages différents ; Ils offrent également différents avantages aux utilisateurs. Les choix de verre varient en fonction des besoins et des goûts de l'utilisateur ainsi que des conditions et exigences de la zone dans laquelle il sera utilisé. Les types de verre généralement utilisés peuvent être répertoriés comme suit [10] :

I.5.1 Selon la composition chimique

Il existe 7 types de verre différents.

I.5.1.1 Verres sodocalciques

Le verre sodo-calcique est le type de verre le plus courant. On l'utilise pour les fenêtres, les bouteilles et les bocaux, mais c'est aussi une alternative économique pour la fabrication de tubes, tiges, plaques et verres de laboratoire.

I.5.1.2 Verres borosilicates

Le verre borosilicate est couramment utilisé pour des applications en chimie et en ingénierie. Le plus connu est le Pyrex (1915) qui possède une bonne résistance aux chocs thermiques. On en fait des ustensiles de laboratoire et de cuisine (résistance à la chaleur et aux agents chimiques).

I.5.1.3 Verres aluminosilicates

Un type de verre peu connu utilisé comme verre niveau en raison de sa température de service élevée et de sa bonne résistance aux chocs thermiques. Il est proposé sous forme de plaque et de tube

I.5.1.4 Verres de silice

Le verre de silice est un verre de haute pureté (99,9999 %) fabriqué selon des procédés synthétiques. On l'utilise pour la fabrication de tubes de lampe à halogène, des éléments d'optique et des miroirs de télescope.

I.5.1.5 Les verres de quartz

Un matériau extrêmement polyvalent pouvant s'utiliser à température élevée dans un large éventail d'applications. Il présente une pureté inférieure et est plus économique que le verre de silice mais il n'assure pas aussi une bonne transmission dans le spectre UV.

I.5.1.6 Verres au plomb

On l'appelle cristal si la teneur en oxyde de plomb est supérieure à 24 %. Il sert en gobeletterie et en verrerie d'art, pour les téléviseurs et en électronique. Le cristal est limpide, très sonore, très résistant à la dévitrification.

I.5.1.7 Verres vitrocéramiques (vitro cristallin)

Ce sont des dérivés du verre dont la fabrication est basée sur le principe de dévitrification. Ils sont notamment utilisés en verrerie culinaire résistante au feu (plaques de cuisson).



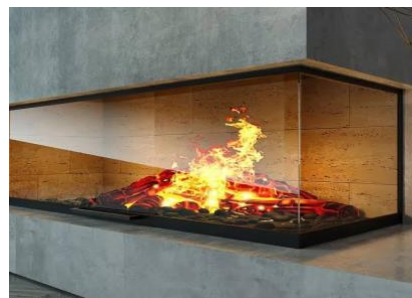
a)



b)



c)



d)

Figure I.3 : Types de verre selon la composition a) verre de plomb, b) de quarts c) flacon en verre sodocalcique, et d) de vitrocéramique

I.5.2 Selon format de produit

Le verre est fabriqué selon plusieurs formats tout dépend son utilisation, à savoir les fibres de verre, le verre creux, les tubes de verre et le verre plat (qui fait l'objet de cette présente étude).....etc.

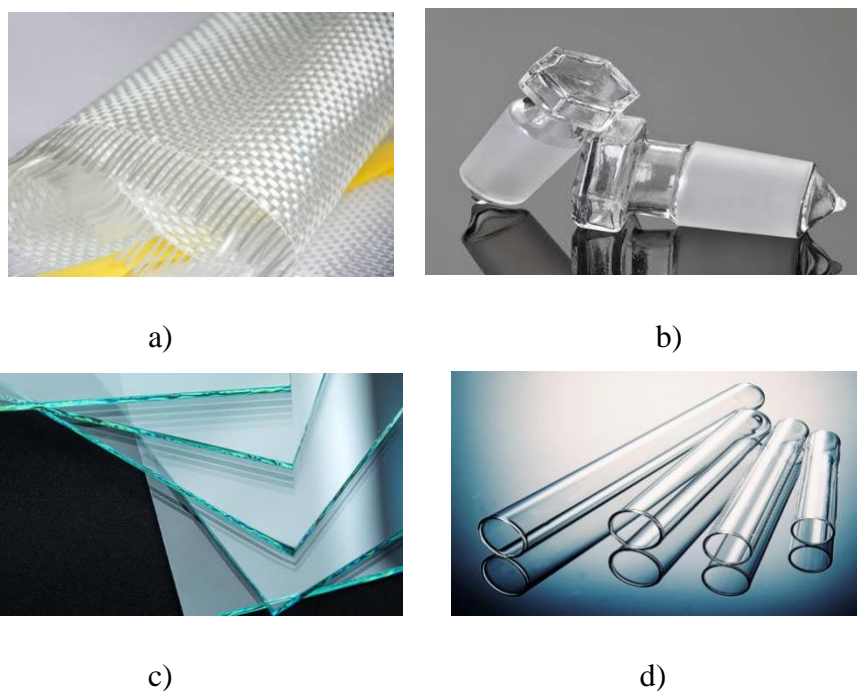


Figure I.4 : Types de verre selon le format : a) fibre de verre, b) verre creux c) plat, (d): en tube

I.6 Verre plat

Le verre plat est un type de verre qui sert à faire des vitrages transparents. Il a été élaboré en soufflant du verre creux sous forme de ballons ou de manchons obtenus en faisant tourner la boule de verre pâteux. Le manchon est ensuite découpé, ou le ballon est écrasé de façon à obtenir une feuille de verre plus ou moins plane. En 1970, Pilkington a développé une autre méthode consistant à couler le verre sur un bain d'étain fondu, c'est le 'Float glass'. Cette technique qui permet d'obtenir un verre transparent de qualité est devenue la principale méthode de fabrication employée aujourd'hui [11].

Les matières utilisées dans la production du verre Float sont : Sable siliceux, Feldspath, Dolomie, Calcaire, Sulfate de soude, Carbonate de soude, Oxyde de fer, Charbon et le Calcin ; on classe a des catégories différentes.

- Vitrifiant (oxyde formateur du réseau vitreux), sable (qui apportera SiO_2).
- Fondant (oxyde abaissant la température de fusion), carbonate de sodium (Na_2O)
- Stabilisant (durabilité chimique) calcaire (CaO), Magnésie (MgO), Alumine (Al_2O_3)
- Calcin (abaissement de la température de fusion) Verre recyclé

- Additifs divers : Oxydes métalliques (colorant, opalisant ...)

I.7 Coloration de verre

La coloration est obtenue avec des oxydes métalliques qui sont fondus avec le verre. On peut aussi appliquer la couleur sur le verre au pinceau. Les couleurs deviennent très vives au XIII^{ème} siècle, et le rouge, le bleu, le vert et le pourpre sont dominants. Le blanc ne sera utilisé que dans la seconde moitié du XIII^{ème} siècle. Le jaune aussi ne sera utilisé que plus tard, au cours du XIV^{ème} siècle, avec l'invention du « jaune d'argent », mélange de sulfure d'argent et d'ocre, ou de chlorure d'argent et d'ocre. Il faut souligner que la teinte naturelle du verre est due à des oxydes métalliques du sable, qui lui donne une teinte bleu-verdâtre. Le verre incolore nécessite l'emploi d'un blanchissant : le dioxyde de manganèse [12].



Figure I.5 : Verre coloré

I.7.1 But de coloration

La coloration des verres a généralement pour but de limiter la quantité de lumière qui rentre dans l'œil soit pour des raisons de confort, soit comme protection solaire mais elle a aussi un rôle esthétique très important [13].

I.7.2 Différents classes de coloration du verre

La coloration d'un verre peut être définie par 2 classes différentes :

I.7.2.1 Coloration directe

La couleur est donnée en ajoutant des mélanges d'oxydes métalliques qui absorbent certaines longueurs d'onde de la lumière. L'oxyde de fer, par exemple, absorbe le rouge et

donne le vert. La tonalité et l'intensité d'une coloration dépendent de la nature et de la quantité des colorants ainsi que de la composition du verre lui-même.

I.7.2.2 Coloration indirecte

Certains oxydes sont en suspension dans la masse vitreuse au cours de la fusion. La coloration apparaît lors du réchauffement du verre aux alentours de 600°C. La chaleur provoque une dilatation des particules qui met en évidence la couleur dans la longueur d'onde souhaitée comme le rose et rouge à l'or ; jaune orangé à rouge sélénium.

Des matières très nombreuses et variées sont utilisées. Généralement, Ces colorants minéraux ont une base métallique, c'est pourquoi ils sont les seuls à pouvoir être mélangés à la silice lors de la fusion [14].



Figure I.6 : Echantillons de verre coloré

Tableau I.1 : Les différents minéraux utilisés avec la couleur correspondante

Couleur	Minéraux métalliques
Bleu	Oxyde de cobalt (CO_3O_4) et de manganèse (MnO)
Jaune	Chrome, argent
Rouge	Oxyde de cuivre (CuO)
Violet	Oxyde de manganèse
Rose et rouge rubis	L'Or
Jaune orange à rouge	Le sélénium

I.8 Composition et matières premières

I.8.1 Traitement du sable

Le sable constitué majoritairement de silice (SiO_2) est l'élément prédominant dans la fabrication du verre, représentant environ 60% de la masse totale du mélange vitrifiable. Pour pouvoir être utilisé dans la production du verre, le sable doit présenter une teneur minimale de 99,30% de silice, qui est l'oxyde principal formant la structure du verre. Avant son emploi, ce sable brut passe par toute une série de traitements. Afin de garantir un produit conforme à ses standards de qualité, MFG s'assure de traiter le sable par ses propres moyens, spécifiquement le sable provenant d'AIN OUSSARA [13].

Dans une première étape, le sable subit un traitement préliminaire qui consiste au tamisage pour éliminer tout gros caillou, du bois et autres impuretés. Le sable est transporté de son emplacement de stockage à l'aide de tapis roulants et est ensuite déversé sur un tamis doté d'une ouverture de 5 mm. Ce tamis est placé sur un dispositif vibrant pour faciliter le passage des grains plus petits que 5 mm. Durant cette opération, une quantité spécifique d'eau est ajoutée pour prévenir l'accumulation du sable au bas du dispositif, assurant ainsi une séparation efficace et évitant l'obstruction du tamis.



Figure I.7 : Traitement du sable (MFG)

Dans la seconde étape, le processus consiste à agiter vigoureusement le sable par une méthode humide dans le but de détacher toutes les particules fines telles que l'oxyde de fer et la boue qui sont collées au sable. Suite à cela, le sable est soumis à un second tamisage où il est

filtré à travers des tamis dont les mailles mesurent 0,5 mm, Ce procédé permet d'éliminer les particules restantes qui sont plus petites et d'assurer une qualité supérieure du sable pour ses utilisations ultérieures.

Un dernier traitement est nécessaire pour éliminer les oxydes de fer qui peuvent encore subsister. Ainsi, le sable est poussé au travers de conduits nommés "spiraux" en suivant un mouvement rotatif descendant. Les grains de sable pur continue de descendre vers le bas du dispositif, tandis que les oxydes de fer en tendance à se diriger vers le centre de celui-ci et ils y seront piéger. Des aimants sont placés en aval de l'installation pour un bon captage des oxydes afin de perfectionner l'opération [11].

I.8.2 Composition chimique de verre et préparation de mélange

En effet, la composition chimique du verre est conçue pour correspondre aux propriétés désirées du produit final ainsi qu'à la disponibilité des matières premières. Pour la fabrication du verre float, qui est typiquement utilisé pour les vitres plates, les composants de base incluent le sable (silice), le carbonate de sodium (soude), le calcaire (carbonate de calcium) et la dolomite (carbonate de calcium et de magnésium). Chacune de ces matières premières est stockée dans des silos dédiés avant d'être prélevée et pesée avec précision pour maintenir la formulation exacte nécessaire à la production d'un verre de haute qualité.



Figure I.8 : Silo dolomie

Les matières premières sont stockées dans des silos conditionnés de telle manière qu'aucune pollution ni transformation (hydratation) ne soit possible. Les matières sont reprises puis pesées pour constituer le mélange vitrifiable, appelé « batch ».

Les poids tiennent compte du degré d'humidité des matières premières pour que les poids des différents oxydes soient constants. En ce qui concerne le sable dont l'humidité est variable. L'indication est transmise au calculateur qui détermine le poids nécessaire. Une fois pesées, les matières premières sont acheminées vers un malaxeur pour obtenir une masse homogène constituant le mélange vitrifiable. Le but de l'homogénéisation est de faciliter les réactions chimiques intervenant au niveau de la fusion, d'accélérer ainsi cette dernière et de permettre l'obtention d'un produit final lui aussi homogène. Le mélange s'effectue en deux temps :

- Mélange des matières par voie sèche.
- Mélange des matières par voie humide.

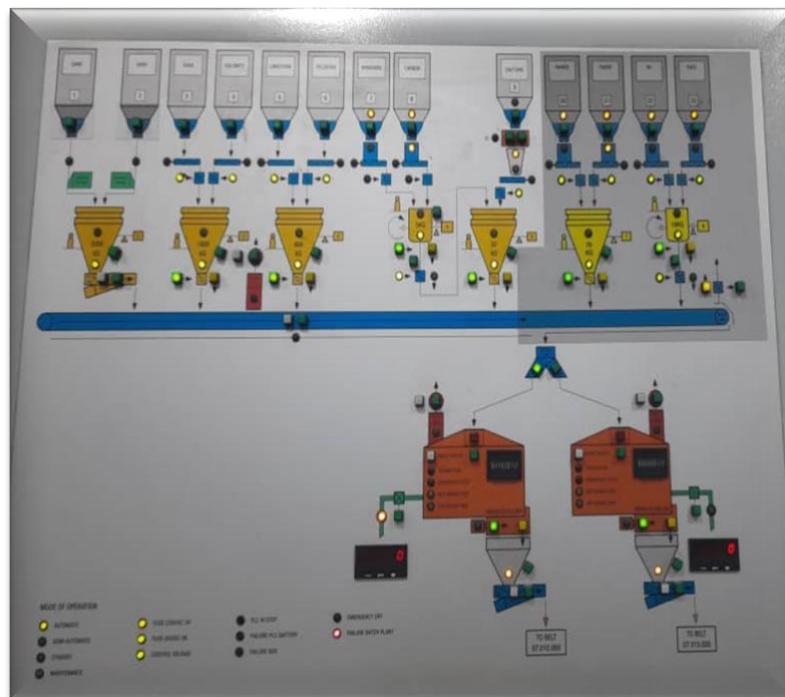


Figure I.9 : Schéma de transport des matières premières au malaxeur

En effet, une addition d'eau chaud est nécessaire pour éviter une ségrégation (ou séparation des grains) du mélange vitrifiable en particulier lors du transport de ce dernier vers le four. Toutefois, des précautions sont à prendre compte-tenu de la présence de carbonate de sodium. Il faut donc éviter la formation de hepta-hydrate et du déca hydrate, et par conséquent

travailler à des températures supérieures à 35,5 °C. Dans la pratique et par mesure de sécurité, il ne faut pas pour autant oublier la géométrie des transporteurs, la multiplication des jetées (chute des produits) affectant elle aussi l'homogénéité [15].

Le taux d'humidité retenu doit être voisin de 4 %. Les temps de mélange sec et humide doivent être déterminés en fonction du malaxeur, sachant qu'il existe un temps optimum pour lequel l'homogénéité obtenue est la meilleure. (Temps de mix teneur 105 second pour un mélange humide et 50 s pour un mélange sec).



Figure I.10 : Malaxeur des matières premières

I.9 Four

Dans l'industrie du verre, divers types de four sont utilisés. Dans le cas de MFG, c'est un four à régénération (structure symétrique : de chaque côté, un nombre de chambres à régénération suivant la capacité de production. Exemple observer au niveau de MFG ou y un four avec 7 chambres de régénération et un second four avec 6 chambres avec une capacité de production inférieure à celle avec 7 chambres) voir une vue au-dessus de la structure du four à régénération.

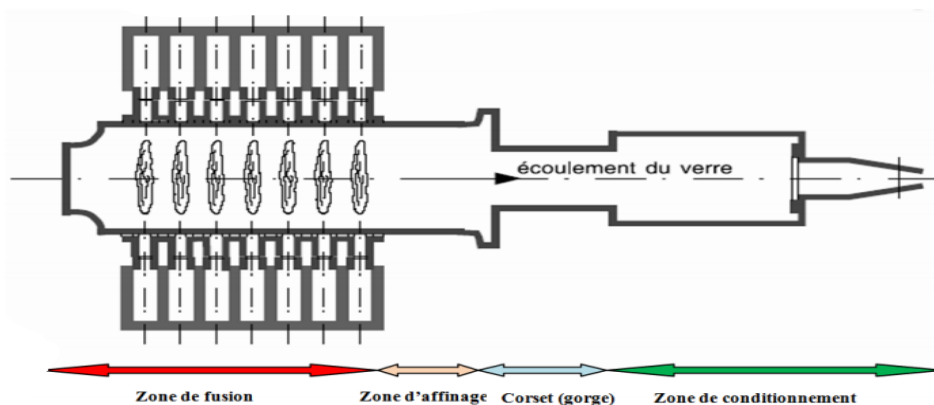


Figure I.11 : Schéma représentant les zones de four

I.9.1 Enfournement

Le mélange est pesé et enfourné grâce à un système entièrement automatisé. De là, il est introduit en continu dans une cuve. Suivant les dimensions de la cuve, jusqu'à 12 000 tonnes de matières premières sont ainsi enfournées chaque jour.

I.9.2 Fusion

Le mélange est fondu dans la cuve à une température de 1550 °C environ. Puis il passe dans la zone d'affinage où le verre est si possible affiner sans bulles. Il est ensuite préparé dans un bassin de trempage pour le façonnage, par refroidissement à une température de 1100 °C. La cuve de fusion et de trempage contient en permanence jusqu'à 1900 tonnes de verre.

I.10 Bain d'étain

Le verre liquide est versé dans un bain d'étain liquide. Le fait de flotter librement sur la surface absolument plane du bain d'étain allié à un chauffage simultané de la surface supérieure (poli naturel) permet d'obtenir une feuille de verre aux faces parallèles, similaire à un miroir. Des rouleaux, appelés Top Rolls, permettent de définir l'épaisseur du verre. L'épaisseur d'équilibre (c'est-à-dire l'épaisseur de verre obtenue sans intervention extérieure) est de 6 mm pour obtenir une épaisseur inférieure, le déplacement de la masse de verre visqueuse doit être accéléré. Pour obtenir une épaisseur supérieure, il doit être ralenti.

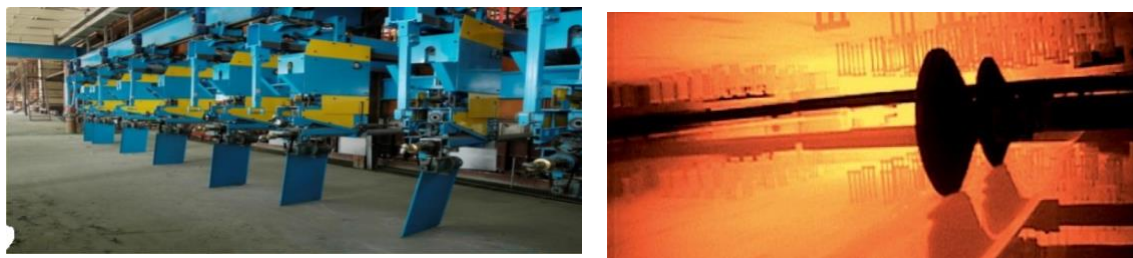


Figure I.12 : a) Zone du bain d'étain et, b) Top Rolls du bain d'étain

I.11 Zone de refroidissement

Après l'étape du bain d'étain, le ruban de verre passe dans le couloir de refroidissement dont la longueur dépasse 140 mètres. Il y est refroidi d'environ 600 à 60 °C. Ce refroidissement lent et contrôlé évite toute formation de tensions internes. C'est un élément important dont dépend la qualité du traitement ultérieur.

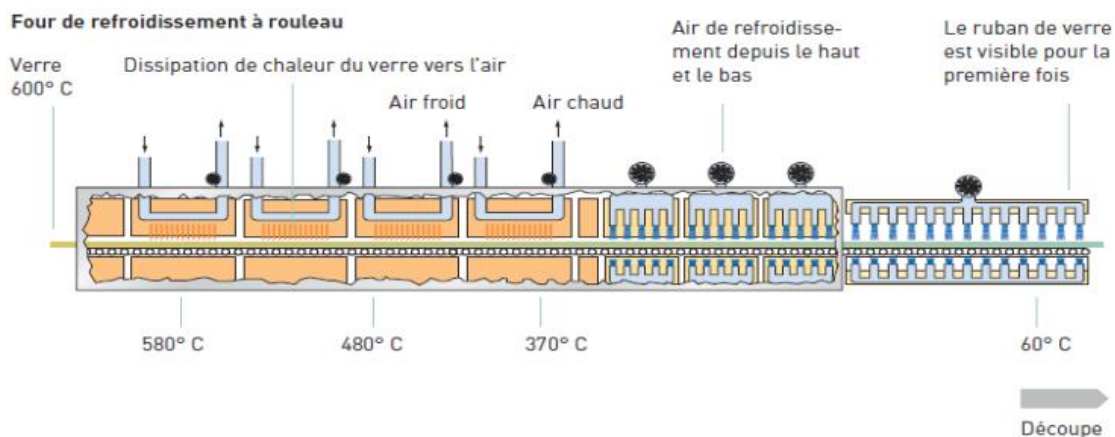


Figure I.13 : Couloir de refroidissement à rouleau (étenderie)

I.12 Système de découpe

La dernière section de la ligne de production est appelée « extrémité froide ». Elle comprend le contrôle qualité et la découpe. Le ruban de verre intégral est contrôlé en continu à l'aide de rayons laser afin de déceler la plus petite imperfection. Il est rare de pouvoir déceler à l'œil nu les zones ne répondant pas aux exigences. Le verre est ensuite débité et empilé, en plaques standard de (3210 x 6000 mm).ou peut également être directement préparé aux dimensions souhaitées par le client à l'aide d'une ligne de coupe séparée.



Figure I.14 : Découpage de verre plat

Le ruban de verre intégral est contrôlé en permanence à l'aide de dispositifs de détection des imperfections, afin de déceler la plus petite imperfection.

Divers problèmes techniques qui entraînent l'apparition de défauts sur le ruban de verre peuvent être identifiés et classés. Ces défauts ont un impact négatif sur le rendement de la production. Les pertes résultant de ces problèmes techniques prennent la forme de calcin.

Tableau I.2 : Types des défauts

Ce tableau résume quelques types de défauts rencontrés lors de la production du verre float : [16]

Type de défaut	Cause probable
Bull d'air	L'atmosphère du point chaud est plus oxydée de manière que l'air ne peut pas être évacué.
Pierre de zircon	La brique AZS (Alumine Zircone Silice) de la paroi du bain, la surface de la brique AZS s'est écaillée et s'est produit le défaut de ZIRCON.
Pierre de silice	Fusion incomplète de la silice
Pierre d'étain	Oxydation d'étain.

La dernière étape après la fin de la production est bien le stockage du verre dans la zone de stockage.



Figure I.15 : Stockage de verre plat (MFG)

CHAPITRE II
MATERIELS ET METHODES

II. CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

II.1 Introduction

Ce chapitre présente le matériel et les méthodes utilisées pour réaliser des expérimentations dans au niveau de la chaîne de production et le laboratoire de contrôle de l'entreprise MFG. Toutes les méthodes suivies et les équipements utilisés ont été bien décrits en détaillant les étapes de chaque manipulation. Toutes les expériences ont été faites plus que deux fois pour assurer la fiabilité la reproductivité des résultats.

II.2 Echantillonnage, préparation et caractérisation de matière première

Le verre est un matériaux composé de plusieurs oxydes à différents proposition. La qualité de verre produit et ces caractéristiques dependent de la quantité de chaque oxyde. Les différents oxydes qui rentre dans la composition du verre plats claire au niveau du l'entreprise MFG sont listé comme suit :

- Oxyde de fer : l'oxyde de fer (Fe_2O_3) est un régulateur de la transmission lumineuse du verre et est considéré également comme colorant conférant au verre une coloration verdâtre.
- Sulfate de soude : le sulfate de soude (Na_2SO_4) est un sous-produit de l'industrie chimique (affinant). Le sulfate de soude contient 43% de Na_2O .
- Feldspath : Le feldspath est un silicate double d'alumine et de potasse, ou de soude, ou de chaux.
- Carbonate de soude : le carbonate de soude (Na_2CO_3) est un sous-produit de l'industrie chimique, il est considéré comme affinant. Le carbonate de soude contient 58.2 % de Na_2O .
- Dolomie : la dolomie est une roche naturelle riche en CaO et MgO , elle joue le rôle de stabilisant dans la composition du verre Float silicate sodo calcique.
- Calcin : le calcin est un verre broyé qui est considéré comme matière première
- Charbon : Le charbon ou poudre de coke sert de réducteur pour le sulfate de soude. Le charbon contient environ 80% de carbone.

II.3 Composition et méthode de préparation du verre plat clair

Ce type de verre est produit au niveau de la ligne de production (du MFG), pour cela, les différentes matières premières déjà stockées dans des silos sont mélangées dans un malaxeur, à des proportions bien définies voir tableau (II.1). Ensuite, Ce mélange, dite mélange vérifiable, est transportés vers le four de la fusion de type (AZS 41), constitué de 7 chambres, sous une température de 1550 °C, ou le mélange se fond complètement dans la quatrième chambre du four (point de la fusion atteint).

L'étape suivante consiste à faire flotté le verre sur un bain d'étain à température 1100 °C pour définir l'épaisseur requis. Après le passage du bain d'étain, l'étenderie permet au ruban de verre de se refroidir dans des conditions contrôlées de température a 600°C. Il est important de signalé qu'une salle de contrôle permet de suivre toute la ligne de production afin de contrôler les épaisseurs et la vitesse ainsi que l'optimisation des différents formats de verre.

Pour une dernière étape, on utilise une molette pour tracer et découper le verre en différent dimensions salon les formats demandés.

Tableau II.1 : Composition massique en matières premières pour la préparation du verre clair

Matière première	Masses (kg)
Sable	2200,57
Carbonate de soude	700,24
La dolomie	640,31
Carbonate de calcium	123,43
Feldspath	54,71
Oxyde de fer	0,6
Charbon	1,43
Sulfate de soude	28,71
Total	3750,00
Calcin	1526

II.4 Composition et réparation du mélange du verre colore

Afin de changer la production du verre clair au verre coloré en changeant la fiche de mélange au niveau de la matière première agissant sur le pourcentage du colorant (gardant les mêmes composants). La production du verre de couleur vert fait l'objet de cette étude dont il ecessaire d'augmenter la quantité de l'oxyde de fer.

De ce fait, et pour une premier essai, la quantite de l'oxyde de fer été augmenté par 40 kg et 25% de calcin clair par mélange, dont le but étant d'avoir une verre coloré nuance 1. Les quantités des autres composants sont gardés unchangeds ou varie légèrement voir tableau (II.2).

Tableau II.1 : Composition massique en matières premières pour la préparation du verre coloré

Matière première	Masses (kg)
Sable	2160,87
Carbonate de soude	693,686
La dolomie	637,81
Carbonate de calcium	124,06
Feldspath	63,54
Oxyde de fer	40,113
Charbon	1,415
Sulfate de soude	28,50
Total	3750,00
Calcin	1018,6

II.5 Effet de changement de la quantité de l'oxyde de fer sur la composition total du verre

Un changement se produit à chaque fois dans la masse d'oxyde de fer (soit diminué ou bien augmentant ou en revenant à la masse initiale). Et des changements se produit également dans la matière première tout dépend les changements des actions remarqué après 7 heures ou plus.

Tableau II.2 : Composition massique du verre coloré en différents quantités d'oxyde de fer
 Fe_2O_3

	Verre coloré (1)	Verre coloré (2)	Verre coloré (3)
Matière première	Poids sec (Kg)	Poids sec (Kg)	Poids sec (Kg)
Sable	2161,21	2149,2	2135,93
Carbonate de soude	713,137	716,114	713,489
La dolomie	640,40	639,94	640,15
Carbonate de calcium	124,56	124,47	124,51
Feldspath	63,91	64,00	63,94
Oxyde de fer	20,240	27,515	23,317
Charbon	1,256	1,361	1,356
Sulfate de soude	25,29	27,41	26,77
TOTAL	3750,00	3750,00	3750,00
Calcin	1022,70	2508,37	1651,39

II.6 Caractérisation du vert coloré

II.6.1 Analyse par Spectrophotomètre

Cette analyse permet de déterminer les différents facteurs de couleur L, a et b. Le Spectrophotomètre utilisé est de la marque LAMBDA 1050, c'est parmi les spectrophotomètres les plus performants de nos temps. Il dispose de deux grands compartiments d'échantillonnage, y compris un banc optique à usage général, la sphère d'intégration et la technologie brevetée accessoire de réflexion Universel. Il est conçu pour atteindre un plus haut niveau de sensibilité, de résolution et de la vitesse dans le domaine du proche infrarouge (250 à 2500 nm), il simplifie l'analyse des échantillons difficiles tels que le verre à absorption élevée, les revêtements optiques ou filtres à couches minces.



Figure II.1 : Spectrophotomètre (LAMBDA 1050)

II.6.1.1 L'espace couleur CIELAB (L^* a^* b^*)

Le CIELAB englobe toute la gamme de la perception humaine des couleurs. Grâce aux mesures de couleur, l'espace colorimétrique CIELAB distingue les différences de couleur avec une précision des couleurs en utilisant trois valeurs de couleur. Cette précision des couleurs permet de reproduire une couleur exacte de manière constante.

La CIE a créé le modèle de couleur $L^*a^*b^*$ pour normaliser et simplifier la communication des couleurs, quel que soit l'appareil utilisé pour les mesurer. CIELAB est un espace plus uniforme où la distance entre les points correspond mieux aux évaluations visuelles.

Les valeurs $L^*a^*b^*$ sont calculées à partir des valeurs du stimulus (X, Y, Z). L'emplacement d'une couleur est défini par sa position dans un système de coordonnées rectangulaires tridimensionnelles où :

L^* indique si l'échantillon est clair (L^* élevé) ou foncé (L^* faible).

a^* et **b^*** représentent la chromaticité (teinte et chroma) de l'échantillon.

- **a^*** indique les couleurs dans le sens du vert.

+ **a^*** indique les couleurs dans la direction rouge.

- **b^*** indique les couleurs dans la direction du bleu.

+ **b** indique les couleurs dans la direction du jaune.

En utilisant les valeurs du système de coordonnées $L^*a^*b^*$, on peut calculer les différences entre les couleurs, ce qui permet un contrôle plus précis de la qualité des couleurs et une évaluation des différences de couleur.

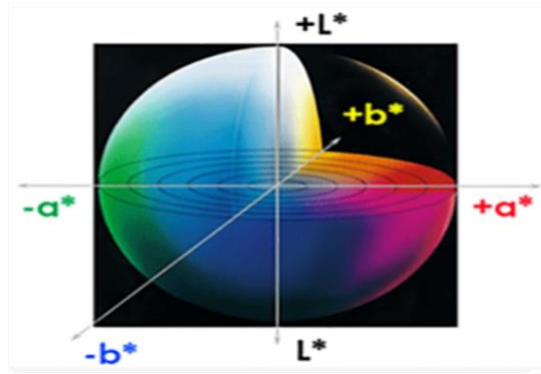


Figure II.2 : Espace colorimétrique du laboratoire Cie

Les résultats du L a b obtenu permettent de calculer l'aberration chromatique (ΔE) selon la formule suivante :

$$\Delta E = [(L^* - L1^*)^2 + (a^* - a1^*) + (b^* - b1^*)^2]^{1/2} \quad (\text{Eq.1})$$

II.6.1.2 Le principe de l'analyse

L'équipement est alimenté 20 min avant l'analyse afin de chauffer des lampes UV utilisés. Dans un premier étape, il faut faire un balayage sans échantillon (la ligne de base), transmission total de l'équipement et cette mesure est obtenue comme une courbe.

Dans le second étape, un échantillon bien nettoyé est mis sur le porte échantillon dont un faisceau incident traverse l'échantillon. les spectres de transmission sont enregistrées à l'aide d'une application (Architectural Glass) doté d'une méthode de mesure (dite d55). Les valeurs de transmission sont inscrites dans une feuille de calcul afin d'obtenir les résultats L, a, et b.

II.6.2 Microscope optique

C'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 (ce qui caractérise sa puissance optique) et de séparer les détails de cette image (son pouvoir de résolution) afin qu'il soit observable par l'œil humain. Et permet d'observer les types des défauts optique (les bulles etc...).



Figure II.3 : Microscope optique

II.6.3 Fluorescence X

La fluorescence X est une technique analytique qui peut être utilisée pour déterminer la composition chimique d'une grande variété de types d'échantillons, y compris les solides et les liquides. La température de la salle d'analyse doit être comprise entre 22°C à 23°C.



Figure II.4 : Spectrométrie de fluorescence X

Pour cette analyse, l'échantillon est préparé d'une forme circulaire avec des diamètres de : 8, 18, et 34 mm. avec des bords parfaitement traités. L'échantillon est mis en place ensuite et bombardé par des rayons x, les spectres obtenus sont comparés par extrapolation avec des spectres des échantillons références pour définir la composition chimique de l'échantillon de verre analysé.

CHPITRE III

RESULTATS ET DISCUSSION

III. CHAPITRE III: RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1 Verre élaboré

Deux types de verres ont été élaborés en utilisant des matières premières avec des proportions bien définies. Le verre clair obtenu est de nuance transparente, uniforme et sans défaut optique. Cependant le verre coloré obtenu présente quelque défaut malgré la réussite de la couleur vert. Sa caractérisation et les effets des conditions de sa préparation sont bien discutés dans les sections qui suit.

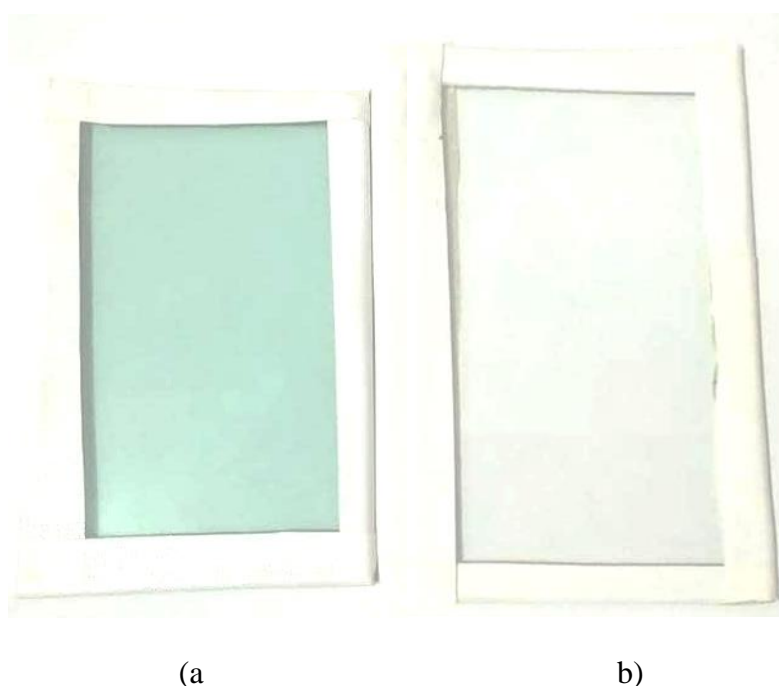


Figure III.1 : Echantillons du verre : a) coloré « vert nuance 1 » et b) clair

III.2 Caractérisations physico-chimiques

III.2.1 Pour la matière première

Les caractéristiques chimiques de la matière première éminente de la fiche technique des matières premières sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : La pureté des oxydes rentre dans la composition du verre

Matière première	Oxyde de fer Fe_2O_3	Sulfate de soude Na_2SO_4	Feldspath	Carbonate de soude Na_2CO_3	Dolomie $\text{MgCa}(\text{CO}_3)$	Charbon
Pureté (%)	95±3	99±0.4	$\text{SiO}_2 \leq 70\%$ $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 16$ $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \geq 12$	99,2±0.4	97±0.5	80±0.3

III.2.2 Caractéristiques granulométriques

Les matériaux contiennent des grains refusés, selon les normes de MFG pour la classification des grains.

Tableau III.2 : Classification granulométrique de sulfate de soude

Classe μm	Grains %
>1000 μm	0
> 630	2
>106 et <160	25
<106	20

Tableau III.3 : Classification granulométrique de feldspath

Classe μm	Grains %
>710 μm	0%
>630 μm	≤1%
>500 μm	≤4%
<106 μm	≤10%

Tableau III.4 : Classification granulométrique de carbonate de soude

Classe μm	Grains %
>2000 μm	0%
>1000 μm	≤2%

>106 μ m et <160 μ m	$\leq 10\%$
<106 μ m	$\leq 3\%$

Tableau III.5 : Classification granulométrique de dolomie

<u>Classe μm</u>	Grains %
>2000 μ m	0%
>1000 μ m	$\leq 30\%$
>106 μ m et <160 μ m	$\leq 10\%$
<106 μ m	$\leq 6\%$

Tableau III.6 : Classification granulométrique du charbon

<u>Classe μm</u>	Grains %
>1000 μ m	0%
>106 μ m et <160 μ m	$\leq 40\%$
<106 μ m	$\leq 5\%$

III.3 Effet des changements de matière première de la chronologie des actions sur le verre élaboré

Depuis le début de la fabrication du verre coloré, il y a des changements de barème (quantité d'oxyde de fer) et le taux de calcin pour suivre leur effet (appelé chronologie des actions) sur les propriétés du verre produit et sa qualité. Les différents changements de matières premières effectuées ainsi que leur effet sur les échantillons du verre prélevé sont regroupés dans le tableau (III.7) suivant :

Tableau III.7 : Les changements de matière première et leurs actions respectives

DATE	Les changements de matière première	Chronologie des actions observées
04/02/2024	Introduction de la quantité verre coloré nuance 1 dosage double quantité 317-02-25% (40 kg Oxyde de Fer) Après 7h : diminution du dosage de l'Oxyde de Fer de 40 à 30 kg et 25% de calcin clair	Aucun changement de la couleur n'a été observé sur l'échantillon prélevé Changement des caractéristiques optiques L*a*b* du verre
07/02/2024	Changement de la quantité vers un dosage normal de l'oxyde de fer 20 kg 25% de calcin clair	Changement des caractéristiques chimiques et optiques du verre, taux d'oxyde de fer dépasse 2800 ppm .
09/02/2024	Diminution taux de calcin de 45 à 35% avec quantité 317-07-35%	45% taux de calcin ne favorise pas la synchronisation avec le mélange, retour vers 35%
13/02/2024	Changement de la quantité vers 317-09-35% avec calcin coloré > 0,500 %	épuisement du calcin clair préparation de la quantité avec calcin coloré oxyde de fer > 5200 ppm
01/03/2024	Lancement 100% calcin	passage à 100% calcin
16/03/2024	Changement de la quantité vers 320-03-35% avec calcin coloré, Oxyde de Fer 14,070kg au lieu 13,971kg	Suivre l'évolution de la teneur en Fe ₂ O ₃ du verre
17/03/2024	Changement de la quantité vers 320-04-35% avec calcin coloré ; diminution % Oxyde de .Fer (changement de cible 0,5300 vers 0,5350) Oxyde de Fer 14,320 kg au lieu 14,070 kg	pas de changement sur les bulles / zébra instable

Il est remarqué que chaque changement de la quantité de matière première influe la qualité du verre élaboré. Malgré que la coloration soit réussite, le verre obtenu présente des défauts optiques dont les causes ne sont pas lié à la teneur en oxyde de fer. Pour cela d'autre changement ont été effectué sur les conditions de la production à savoir le temps du mélange, changement de la balance, direction de la rotation des malaxeurs...etc.

Un changement du temps de mélange sec de 50 à 80 secondes, remplacement de la balance n°7 de 70 kg et utilisation de la balance N°8 de 15 kg pour le dosage de l'oxyde de fer

13,483 kg et démarrage des malaxeurs en sens inverse pour assurer l'homogénéité de mélange ont été considérés.

III.4 Les changements des températures dans le four

Pour la coloration du verre, un système électrique appelé (Boosting) est installé dans différentes positions au niveau du four dont la fonction principale est de renforcer l'apport en énergie thermique (chaleurs). Il fournit de l'énergie supplémentaire directement au verre qui se trouve dans la cuve du four par convection et contribue à augmenter la capacité et la vitesse de la fusion du verre dans le four. Il se compose des trois zones suivantes :

-Point chaud : Température de port 4 dans le four de fusion

-Affinage : La zone située avant le bassin de repos, La température à laquelle les bulles d'air sont éliminées.

-Bassin de repos : La zone de refroidissement du verre sans aucune influence externe (partie du four où le verre est laissé pour stabilisation).

Tableau III.8 : Changements des températures du four en fonction des jours de la production

Date	Les zones de four	Température point chaud	Température Affinage	Température bassin de repos
	Types de Verre			
30/01/2024	Verre clair	1577	1461	1183
31/01/2024		1577	1460	1182
03/02/2024		1578	1460	1183
04/02/2024	Verre coloré	1593	1465	1182
05/02/2024		1665	1574	1200
06/02/2024		1676	1598	1207
07/02/2024		1666	1600	1202
09/02/2024		1660	1575	1198
10/02/2024		1653	1568	1193
13/02/2024		1639	1543	1203
01/03/2024		1626	1542	1179

16/03/2024		1634	1540	1176
17/03/2024		1631	1540	1173

Il est remarqué que la matière est avancée au port 4 dans le four sans fusion, pour cela Une augmentation de température était nécessaire. La fusion totale est assurée en utilisant le système de boosting pour assurer la fusion du verre au niveau de port 4, ce qui contribue à augmenter la température du four rapidement.

III.5 Caractérisation physico-chimique du verre élaboré

III.5.1 Contrôle de conformité

III.5.1.1 Le test de lumière latérale

En visualisant l'image représentée sur la figure III.2, il peut être remarqué la présence des bulles d'affinages. La présence de ce type des bulles n'est pas appréciée dans le produit finis étant considéré comme défaut qui diminue la qualité du verre élaboré. Du coup, il ne peut pas être commercialisé.



Figure III.2 : Imagerie illustrant les bulles d'affinage par lumière latérale

III.5.1.2 Test zébra

Il est remarquable que les lignes de la plaque soient uniformes sans aucun défaut ou déformation avec obtention d'une angle de 50° degré au milieu et 45° dans les bordures selon la norme internationale exigé (Figure III.3).



Figure III.3 : Imagerie illustrant le test Zébra

III.5.2 Analyse par spectroscopie de fluorescence X du verre élaboré

L'appareil fluorescence X permet d'identifier la composition chimique du verre obtenu. Les résultats correspondants à la composition chimique pour le verre clair et le verre coloré sont regroupés respectivement dans les tableaux III.9 et III.10 suivants :

Tableau III.9 : Compositions chimiques du verre clair obtenu par fluorescence X

Teneur% Date	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	SO ₃ (%)	TiO ₂ (%)
01/02/2024	72,40	0,44	0,071	8,79	4,37	13,53	0,23	0,201	0,024
02/02/2024	72,39	0,44	0,074	8,84	4,38	13,57	0,23	0,209	0,025
03/02/2024	72,36	0,44	0,074	8,84	4,35	13,58	0,23	0,208	0,026
04/02/2024	72,38	0,44	0,076	8,89	4,36	13,59	0,23	0,200	0,029

Tableau III.10 : Compositions chimiques du verre coloré vert obtenus par fluorescence X

Teneur % Date	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	SO ₃ (%)	TiO ₂ (%)
04/02/2024	72,43	0,45	0,079	8,81	4,34	13,58	0,23	0,193	0,029
	72,43	0,44	0,096	8,85	4,35	13,59	0,23	0,195	0,030
05/02/2024	72,39	0,44	0,155	8,86	4,35	13,57	0,23	0,190	0,030
06/02/2024	72,22	0,45	0,340	8,79	4,34	13,53	0,23	0,178	0,031
07/02/2024	72,28	0,44	0,464	8,87	4,34	13,64	0,23	0,170	0,032

09/02/2024	72,14	0,44	0,525	8,86	4,35	13,63	0,23	0,174	0,032
13/02/2024	72,21	0,44	0,545	8,86	4,36	13,67	0,23	0,165	0,033
01/03/2024	72,14	0,44	0,526	8,91	4,36	13,74	0,23	0,178	0,043
	72,13	0,43	0,549	8,91	4,36	13,76	0,23	0,179	0,043
	72,20	0,44	0,525	8,90	4,38	13,74	0,22	0,168	0,043
13/03/2024	72,17	0,43	0,535	8,91	4,38	13,73	0,22	0,169	0,043
16/03/2024	72,18	0,42	0,528	8,90	4,35	13,66	0,22	0,168	0,043
17/03/2024	72,15	0,42	0,510	8,90	4,37	13,74	0,22	0,167	0,043
	72,15	0,42	0,543	8,88	4,37	13,77	0,21	0,158	0,042
18/03/2024	72,12	0,42	0,507	8,95	4,39	13,77	0,22	0,174	0,032

Selon les deux tableaux, le taux de la silice est de 72% répondant aux normes exigées par la société. Pour les deux types des verres les taux des autres oxydes sont les mêmes pour le verre clair et le verre coloré .La seule différence étant dans la teneur de l'oxyde de fer. Pour le verre clair ce taux est aux alentours de 0,07 % qui est le taux donnant la nuance clair du verre. L'augmentation du taux de Fe_2O_3 est responsable de l'apparition de la couleur vert dans le verre. Pour cela, trois zones peuvent être distinguées comme suit :

- Zone A : [0,079-0,155%] on Fe_2O_3 , dans cette partie, la quantité de l'oxyde de fer est augmenté progressivement due à la présence d'une autre quantité de Fe_2O_3 dans le mélange du verre claire trouvé préalablement au niveau de four.
- Zone B : une augmentation notable de l'oxyde de fer passant de 0,155 au 0,340%, Cette augmentation Correspond aux actions (action du 07/02/2024), la cible est rapproché rapidement, avec le début de l'apparition des défauts optiques à partir du 07/02/2024 Correspondante à l'ajout du (20 kg) d'oxyde de fer.
- Zone C : La cible est accède après le 09/02/2024 lors de l'ajout 40 kg de Fe_2O_3 avec 35% de calcin. Cependant les défauts optiques persistent toujours (défauts milieu gauche et milieu droit). Avec la même teneur $\geq 0,500$ de Fe_2O_3 et après quelques jours des défauts tri-optiques ont été remarqué sur les plaques du verre coloré obtenues (Voir Figure III .5).

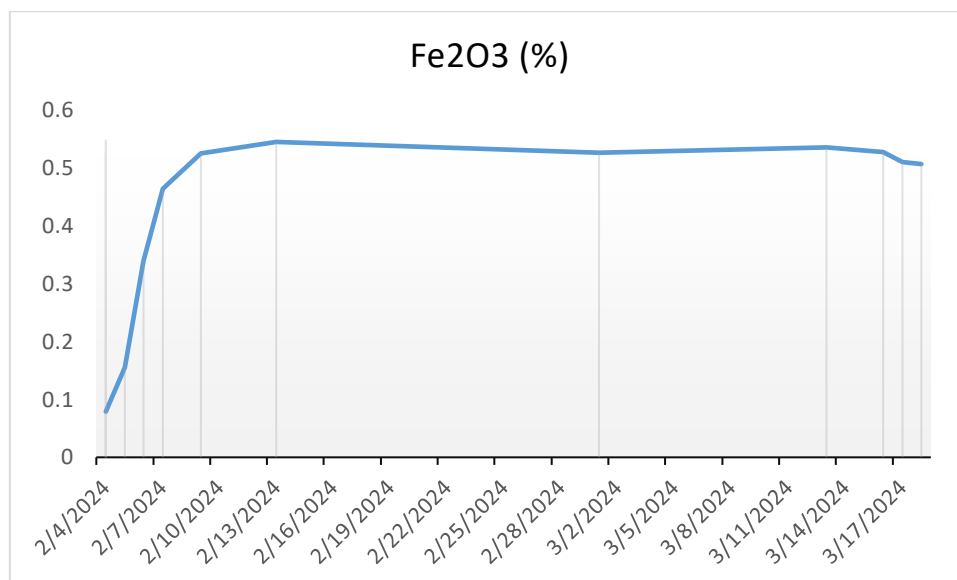


Figure III.4 : Courbe d'évolution de la teneur d'oxyde de fer



Figure III.5 : Défauts tri optique fournie par le laboratoire central (MFG)

III.5.3 Analyse par spectrophotomètre L a b

Le tableau III.11 regroupe l'ensemble des résultats relatifs aux facteurs de couleur (L a b) et l'aberration chromatique ΔE . Pour que le verre soit conforme et répond aux exigences de l'entreprise MFG, les valeurs du ΔE ne faut pas dépasser 2,5 ($\Delta E \leq 2,5$).

Dans les premiers essais l'indice d'aberration était super élevé par rapport à la norme, atteignant le 8,65, dans le Cas la cible était assez loin. En rapprochant de la cible, (Couleur vert) l'indice ΔE diminue fonction de la variation des facteurs (L, a, b). Cette valeur signifie que la séparation des couleurs est minime et le verre obtenu est de bonne qualité en terme optique et réflexion des couleurs. Toutefois, et même si ΔE répond à la norme le verre coloré obtenue présent quelque défaut dont la cause reste indéterminé.

Tableau III.11 : Résultats optiques (L* a* b*)

Date	L*	a*	b*	ΔE Aberration chromatique
Cible - Verre coloré vert nuance 01	89,96	-7,33	1,12	≤ 2.5
04/02/2024	95,91	-1,05	0,19	8,65
05/02/2024	94,29	-3,22	0,19	6,85
06/02/2024	92,17	-5,58	0,37	3,91
07/02/2024	90,82	-6,90	0,66	2,23
08/02/2024	90,45	-7,12	0,68	1,03
09/02/2024	90,48	-7,25	0,66	0,78
10/02/2024	90,47	-7,25	0,69	0,67
16/02/2024	90,37	-7,23	1,00	0,44
23/02/2024	90,34	-7,28	1,06	0,74
25/02/2024	89,48	-7,19	1,21	0,35
26/02/2024	90,29	-7,24	1,102	0,34
01/03/2024	90,43	-7,19	1,087	0,49
13/03/2024	90,46	-7,22	1,01	0,52
17/03/2024	90,47	-7,14	1,05	0,54
18/03/2024	90,41	-6,89	1,30	0,65

Les résultats de ΔE sont liés aux valeurs de L, a, b. A partir de la courbe III.6, il est remarqué qu'au début de production de verre colorée (04/02/2024), les valeurs de ΔE représentant un écart considérable par rapport à la cible (8,65), Et après trois jours (à partir du 07/02/2024) les valeurs de ΔE atteignent la cible de verre coloré vert (≤ 2.5). Selon les résultats du ΔE qui déterminent le degré de couleur du verre, la couleur souhaitée (verre vert) a été obtenue.

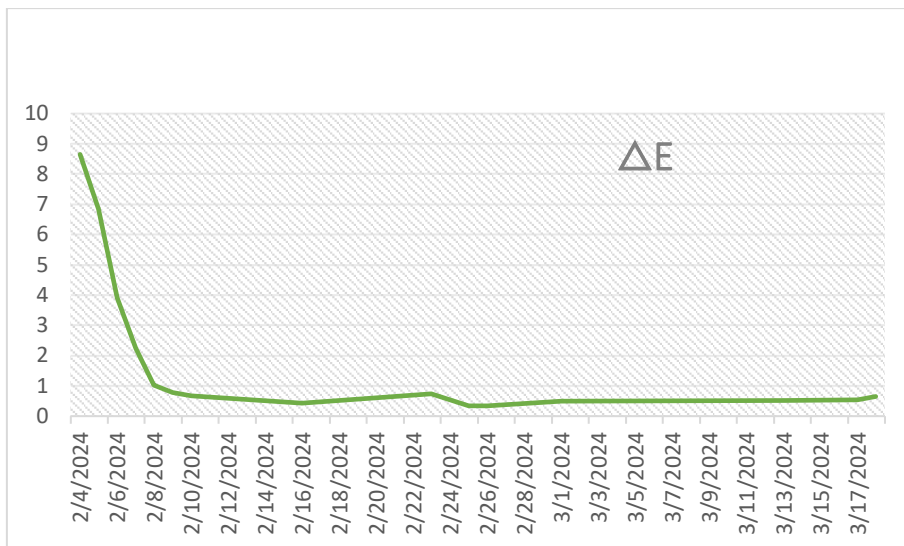


Figure III.6 : Courbe de variation de ΔE

CONCLUSION

Ce présent travail a été réalisé au niveau de la société MFG de la production du verre float. Ce travail a permis de suivre le processus de fabrication du verre float coloré sur les différentes lignes depuis la matière première jusqu'au produit fini.

Deux verres ont été préparés. Verre clair, Qui sert comme référence, et un verre coloré du couleur vert. La modification de la quantité de Fe_2O_3 dans la composition du verre permet de contrôler l'apparition de la couleur vert, différents essais ont été faits afin d'optimiser les conditions optimales pour la production de verre coloré sans aucun défaut. A savoir la variation de la teneur en Fe_2O_3 , variation de température du four, du temps de mélange, etc...

Plusieurs techniques ont été exploité pour caractériser le verre coloré obtenu et détecter les défauts éventuels qui peuvent se présenter.

La fluorescence X a permis d'identifier les composants chimiques du verre. La comparaison de la quantité de composants chimiques du verre coloré et du verre clair, indique que la différence dans la quantité de fer était nettement très élevée dans le verre coloré par rapport à sa quantité dans le verre clair. L'analyse par spectrophotomètre a été utilisée pour déterminer les différents facteurs de couleur (L a b). Et les résultats étaient conformes avec la norme lors de l'atteinte de la cible.

L'observation au microscope optique a relevé l'apparition d'un grand nombre des défauts optiques dans le verre coloré à savoir la présence des bulles d'affinage.

Malgré la réussite à l'obtention de la nuance (1) du couleur verte souhaité, I le verre produit présente toujours des défauts optiques indésirables qui le rendent non commerciale. De ce fait, et pour bien contrôler et maîtriser la prochaine production du verre coloré nous proposons des suggestions qui pourront aider à trouver des solutions.

Au niveau de matière premier :

- Mettre en place système pré mélange pour l'oxyde de fer (Mélanger l'oxyde de fer dans un petit malaxeur avant de le combiner avec les matières premières).
- Installer une vanne pneumatique ou un vibreur au niveau de la balance Fe_2O_3 .

Au niveau de four :

- Mettre en service le système boosting 08 heures après l'enfournement.

- Ajouter un système anti-mousse (nouveau système place dans le port 3 pour éliminer la mousse qui apparait en raison de température élevée dans le four).
- Ajuster la longueur des flammes (afin de couvrir 2/3 de largeur du four).
- Positionner les malaxeurs à 210 mm (8 tours/min).
- Utiliser un nouveau système dans le four avec le système de boosting.

REFERENCES

- [1] Wuhan Textile University, Wuhan, Hubei 430073, China
- [2] Demirci. S. Akçay, S. (2023). "Usage Areas of Glass Used as a Design Material in Design". Turkish Journal of Fashion Design and Management (TJFDM), 2023, 5(3): 207-225. doi: 10.54976/tjfdm.1316461
- [3]: https://www.verreonline.fr/v_gene/hist_01.php
- [4] :https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=http://chimie.drsahar.blogspot.com/2014/08/generalites-sur-les-verres.html%3Fm%3D1&ved=2ahUKEwiLpJXlneqEAXUOUaQEHVjyDFY4HhAWegQIDRAB&usg=AOvVaw3NstlWe2xVz_FSeAkDHJ-g
- [5] : <http://www.primeverre.com/tout-sur-le-verre/definition/>
- [6] : <https://lesjoyeuxrecycleurs.com/lexique/le-verre/>
- [7]: <https://material-properties.org/fr/verre-densite-capacite-thermique-conductivite-thermique/>
- [8] : <https://infovitrail.com/contenu.php/fr/d/---les-proprietés-du-verre/eb96853d-c67e-4ec6-b993-479cb5a07cf8>
- [9] : <https://www.paprec.com/fr/solutions/les-matieres-que-nous-valorisons/verre/la-classification-des-differents-types-de-verre/>
- [10] :https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/13037/1/BEKAKRIA_THEBET_F1.pdf&ved=2ahUKewis0fuQmqOFaxVTVEEAHaSrBug4ChAWegQIBhAB&usg=AOvVaw2RC_Bz8z_vjHjrJT_xgfMc
- [11] : <https://artisanatmedieval.wordpress.com/2016/04/22/la-composition-du-verre-auxiiieme-siecle/>
- [12] : <https://www.lopticomaroc.com/2019/09/13/la-coloration-des-verres-ophtalmiques/>
- [13] : <https://fr.scribd.com/document/562100589/Coloration-Des-Verres-de-Silice>

[14] : Documentation interne de l'entreprise MFG.

[15] :https://dspace.univguelma.dz/jspui/bitstream/123456789/11675/1/AMIROUCHE_AHMED%20RAZIK_F1_G%C3%A9nie%20des%20Proc%C3%A9s_G%C3%A9nie%20des%20proc%C3%A9s%20des%20mat%C3%A9riaux.pdf.

APPENDICES

APPENDICES

APPENDICE A : PRESENTATION DE L'ENTREPRISE

A.1 Histoire et évolution de MFG

Méditerranéen Float Glass ou MFG par abréviation, est une Entreprise Algérienne qui a pour principale activité, la production et la transformation du verre float. MFG, est une filiale du premier groupe industriel privé en Algérie CEVITAL., crée en Avril 2007, en vue d'exploiter la plus grande ligne de production en Afrique et l'unique producteur de verre plat au niveau maghrébin, d'une capacité de 600 Tonnes par jour, ce qui est largement supérieur aux besoins nationaux. 70% de la capacité installée est donc destinées à l'exportation.

Le complexe est implantée au niveau du site de l'araba dans la wilaya de Blida et a nécessité un investissement de 100 Million d'Euros et fait partie d'un grand projet constitué de 3 lignes de verre plat d'une capacité totale de 642 400 Tonnes par an et de 57 usines de transformation de verre.

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

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

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

A.2 Objectifs de MFG

Dès ses débuts, cette entreprise s'est fixé des objectifs à atteindre, parmi ses objectifs nous pouvons citer ce qui suit :

- . Satisfaction des clients
- . Optimiser sa part du marché international.
- . Satisfaire les demandes du marché
- . Respecter l'environnement et l'hygiène et sécurité de ses employés.

. Aboutir les certificats suivants :

. ISO (international standardisation organisation)

.QHSE (qualité, hygiène, sécurité environnement)

.Un développement qualitatif et quantitatif de la production, pour cela, la société MFG envisage de réaliser une deuxième ligne d'une capacité de 800tonnes/jour

. La réalisation de ce projet constitue l'une des étapes pour faire de MFG un opérateur incontournable dans le monde du verre plat.

A.3 Effectifs de MFG

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

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

A.4 Développement

Dans le cadre de l'extension de ces capacités de production MFG envisage de réaliser une 2eme ligne d'une capacité de 800tonnes/jour la réalisation de ce projet constitue l'une des étapes pour faire de MFG un opérateur incontournable dans le monde du verre plat.

Par ailleurs dans le but d'optimiser sa part du marché international, MFG diversifie sa gamme de production à l'expert en créant sa ligne de verre feuilleté avec une capacité de 400tonnes/jour essentiellement en format PLF.

Mais pour satisfaire les demandes du marché national MFG prévoit de doter cette Ligne de table de découpe en formats DLF et 1/2DLF.

A.5 Applications du verre float

Le verre float est utilisé principalement dans l'architecture pour les façades de bâtiments, les fenêtres, les vitrines de magasins, les toitures, les présentoirs d'exposition et l'ameublement intérieur pour les magasins ou les appartements, ainsi que dans la fabrication d'autres meubles en verre. Il trouve aussi des applications dans l'industrie automobile ainsi que dans le domaine de l'électroménager.