République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET METALLURGIE

ENSMM–annaba–

DÉPARTEMENT SCIENCE ET GÉNIE DES MATÉRIAUX

Mémoire de fin d'études

INGENIEUR: Science et Génie des Matériaux

THEME :

ETUDE DU RENDEMENT THERMIQUE (DEBIT SPECIFIQUE) DE LA 1ERE LIGNE FLOAT ET L'AMELIORATION A APPORTEE POUR OPTIMISER LA CONSOMMATION ENERGETIQUE DU GAZ

Présentée par : - BOULMERKA RIHANE

Encadrée par : - Dr. TAIBI YASMINA

Membres du jury : -Dr. BELHANI MEHDI Président
-Dr. BENDJEDDOU LOUIZA Rapporteur

Juin 2016

DEDICACES

Avant tous, je dédie ce modeste travail

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

A mon frère Mohamed et mes chères sœurs :Chayma,Khawla ,Isra pour le soutien morale,

A mon encadreur, Dr. TAIBI, pour l'encouragement qu'elle ma donnée tout au long de ces derniers mois,

A mes amies, Khaoula, Ahlem,Lamis,Sara ,Amina,Ikram,qui ont toujours été présent pour moi,

A mes oncles surtout ,mon oncle Saïd,et mes chères tantes, Nadia,Nadjet,Yasmina, mes cousins et mes cousines,

A mon grand-père, qu'ils reposent en paix,

A mon grand-père et mes grands-mères,

A mes camarades que j'ai rencontrés à Annaba,

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

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

RIHANE

Remerciements :

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

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

J'adresse tous mes remerciements aux membres du jury, particulièrement à Dr. Belhani qui m'a fait l'honneur de présider le jury et à Dr .Bendjeddou qui a accepté d'être rapporteur de ce mémoire.

Je tiens aussi à remercier les enseignants qui ont veillé à notre formation tout au long de notre cursus universitaire au sein de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines et Métallurgie, ainsi que tout le personnel administratif.

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

Merci également à Mr. KAMIM Toufik qui a témoigné un intérêt tout particulier pour mon travail. Un remerciement spécial aux personnels du laboratoire ; Farid, Mohamed, Imène, Amina, Rym, Souhila, Hala. Je voudrai les remercier pour l'accueil qu'ils m'ont fait au sein du laboratoire central.

A tous les employés et cadres de l'entreprise MFG qui, sans leur dévouement, ce travail n'aurait pas pu voir le jour ; Mr. Hamid, Mr.Youcef, Mr.Jamel, Mr.Mouloud pour la gentillesse et le sens du partage. Je voudrai simplement leur dire merci.

Un sincère remerciement à tous les amis au sein de l'Ecole Nationale Supérieur des Mines et Métallurgie pour leur soutien et les bons moments qu'on a partagé ces dernières années.

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

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

Table des matières **page**

Dédicaces

Remerciement

Liste des figues

Liste des tableaux

Résumé

Introduction générale 1

La première partie : ETUDE BIBLIGRAPHIQUE

I. Présentation du lieu de stage

1. Localisation 3
2. Les effectifs de MFG 3
3. Développement 3
4. Distribution 4
5. Organisation structurelle de MFG 4

II. Notions de base sur le verre

I. Histoire sur verre 5

II. Définition du verre 5

III. Transition vitreuse 6

IV. Structure du verre 7

IV.1. Oxydes formateurs 7

IV.2. Oxydes modificateurs 7

IV.3. Oxydes intermédiaires 8

V. Différents types de verre industriel 8

V.1 Verres plats 8

V.2. Verres creux 8

V.3. Fibres de verre 9

III. Le procédé Float

I. Définition de verre float 10

II. Matières premières pour la formation du verre Silicate Sodo-Calcique 10

1. Sable (SiO_2) 10
2. Carbonate de soude (Na_2 CO_3) 10
3. Dolomie ($CaMg$ $(CO_3)_2$) 10
4. Calcaire ($CaCO_3$) 11
5. Feldspath [(K,Na) $AlSi_3O_8$] 11
6. Sulfate de sodium (Na_2SO4) 11
7. Charbon 11
8. Oxyde de fer 11
9. Calcin 11

III. Le procédé de fabrication de verre float 11

III.1. Fusion 12

III.2. Mise en forme du verre float 1

III. 2.1.Principe 12

III.2.2. Bain d'étain 12

III.3. Recuit du verre float 14

III.4. Découpe du verre float 14

IV. Types des fours de verrerie

I. Généralités 15

II. Classes des fours de verrerie de coulée continue 15

II.1 Fours à flammes 15

II.1.1 Conception générale 1

II.1.2 Classification 16

II.1.2.1 Four à brûleurs à air froid 1

II.1.2.2 Four à régénérateurs 17
a. Four type à flamme en boucle 17
b. Four type à brûleurs transversaux 18
II.2 Les fours électriques 19

V. Four de verrerie MFG

I. Conception du four 20
1. Enfournement 20
2. Zone de fusion 20
2.1Corps de fusion 21
2.2Chambres régénératrices 22
2.3Système de régénérateurs 22
3. Zone d'affinage 23
4. La gorge 23
5. Zone de conditionnement 23
II. Processus de fusion du verre dans le four 23
1. formation des silicates 23
2. Formation du verre 24
3. Affinage du verre 24
4. Homogénéisation 25
5. Refroidissement 25
III. Circulation des fumées dans le four de fusion 25
III.1 Les différents modes d'échange 25
1. Le rayonnement 25
2. La convection 26
3. La conduction 26
IV. Les courants convectifs du four 26
1. Courants transversaux 27
2. Courants longitudinaux 27
V. Matériaux réfractaires pour la conception du four 28

La deuxième partie : ETUDE EXPERIMENTALE

I. Aperçu sur l'objectif du travail 30
II. Calcul du débit spécifique (la consommation spécifique C_S) 31
A. La première méthode : composition chimique du verre 31
a. Méthode d'analyse chimique utilisée : fluorescence X 31
b. Mode opératoire de la préparation de la pastille de l'échantillon 33
c. Les exigences techniques MFG des matières premières 35
d. Calcul de la consommation d'énergie par unité de verre liquide pour le four de fusion 35
1. Calcul de la quantité d'oxyde formé dans 100kg de la matière mélangée 35
2. Constante de vitesse de la fusion 37
3. Energie consommée pour la formation de silicate 37
4. Composition du gaz libéré par 100kg de la matière mélangée 38
5. Calcul de la quantité d'utilisation de la matière mélangée avec calcin (%30) 39
6. Calcul d'Energie consommée 40
a. l'énergie consommée pour la formation de silicate q_I 40
b. Energie consommée pour la formation de verre liquide q_{II} 40
c. Energie consommée pour réchauffer le verre liquide jusqu'à une température de 1410°C q_{III} 40
d. l'énergie consommée de la libération de gaz réchauffant à la température de 1410°C q_{IV} 41
e. l'énergie consommée pour l'évaporation de l'eau q_v 41
f. L'énergie absorbée q_{VI} 41
g. L'énergie consommée pour la fusion de 1kg de verre pendant le processus de formation de verre 42
B- La deuxième méthode : par le débit de gaz(CH_4) 44

III. Influence des paramètres du régime thermique sur la qualité du produit(le débit spécifique) 50

III.1 Influence des courants convectifs sur la qualité du produit fini 50

III.2 Etude l'influence de la dégradation du four sur le produit fini 52

III.3 Influence des matières premières 57

III.3.1 Analyse granulométrique 57

a. Mode opératoire d'analyse granulométrique 57
b. Analyse de la granulométrie du sable 58
c. Analyse de la granulométrie du calcaire 60
d. Analyse de la granulométrie de dolomie 61

III.3.2 Analyse d'humidité des matières premières (sable, calcaire, dolomie) 62

a. Mode opératoire d'analyse d'humidité 62
b. Analyse de l'humidité du sable 62
c. Analyse de l'humidité de la dolomie 63
d. Analyse de l'humidité de la dolomie 64

Conclusion générale et recommandations 66

Références bibliographiques

Annexes

Liste des Figures

La première partie : Etude bibliographique

I. Présentation du lieu de stage

N°. figures		Pages
I.1	Organigramme générale du MFG.	4

II. Notion de base sur le verre

N°. figures		Pages
II.1	Représentation bidimensionnelle de a) la structure de la silice cristalline et b) d'un verre silicaté selon Zachariasen. ●: Si, □: Oxygène	6
II.2	Genèse de l'état vitreux	6
II.3	Représentation schématique de la structure de verre de silice	7

III. Le Procédé Float

N°. figures		Pages
III.1	Schéma du procédé float	11
III.2	Schéma d'une série du Top Rolls (vue de l'intérieure)	12
III.3	Un Top Roll en contact avec le ruban du verre	13
III.4	Résistances électriques du bain	13

IV. Type des fours de verrier

N°. figures		Pages
IV.1	Four pour verre creux. Régénérateurs, flammes en boucle	16
IV.2	Four « float », Régénérateurs ; brûleurs latéraux.	16
IV.3	Four à brûleurs à air froid, type Unit Melter	17
IV.4	Four à régénérateurs, chauffage par flammes en boucle (Simple chambre)	18
IV.5	Four « float » à régénérateurs	18
IV.6	Four électrique, électrodes en sole et parois	19

V. Four de verrerie MFG

N°. figures		Pages
V.1	Une coupe du four à flamme transversale.	20
V.2	Chambre de fusion (four de l'industrie MFG)	21
V.3	Four à brûleurs transversaux (coupe transversale)	21
V.4	Brique d'empilage de la chambre régénératrice	22
V.5	Photo des briques d'empilage du four MFG	22
V.6	Courants de verre dans la cuve	27
V.7	L'orientation des courants transversaux	27
V.8	Courants longitudinaux (coupe de profil)	28
V.9	Courants longitudinaux (coupe de haut)	28
V.10	Réfractaires électrofondus type AZS	29
V.11	Réfractaires électrofondus d'alumine (corindon)	29

La deuxième partie : ETUDE EXPERIMENTALE

N°. figures		Pages
1	Photo d'un Mini Fuse	32
2	La mise en forme de perle.	32
3	Polisseuse pour la préparation des échantillons	32
4	Appareil de l'analyse chimique par fluorescence	32
5	Graphe représentatif du débit spécifique en fonction des mois de l'année 2011	45
6	Graphe représentatif du débit spécifique en fonction des mois de l'année 2015	47
7	Graphe représentatif du débit spécifique en fonction du premier trimestre de 2016	48
8	Régime thermique du four à régénérateurs	51
9	Les températures de voûte en mois d'avril 2016	51
10	La courbe du feu de voûte en mois d'avril 2016	52
11	Le pourcentage des bulles d'air pour les années 2011,2015et 2016	54
12	Bulle de soude de sulfate(x 100)	54

13	Bulle de soude de sulfate sous lumière orthogonale(x 100)	54
14	Pourcentage des pierres de zircone pour les années 2011,2015et 2016	55
15	Zircon primaire en œuf, formation de zirconium(x 100).	55
16	Zircon secondaire(x 100).	55
17	Pourcentage des pierres de corindon pour les années 2011,2015et 2016.	56
18	Pierre de corindon granulaire de nature Al-Si(x 100)	56
19	Pierre de corindon sous lumières orthogonale(x 100)	56
20	Etuve de séchage.	58
21	Deviseur rotatif modèle (PT100)	58
22	Tamiseur Retsch AS200	58
23	Granulométrie moyenne du sable en (%) pour les années 2011, 2015et 2016.	59
24	Granulométrie moyenne du calcaire en (%) pour les années 2011, 2015et 2016.	60
25	Granulométrie moyenne de la dolomie en (%) pour les années 2011, 2015et 2016.	61
26	Appareil de mesure d'humidité (dessiccateur infrarouge)	62
27	Moyenne d'humidité du sable en (%) pour les années 2011,2015et 2016	63
28	Moyenne d'humidité du calcaire en (%) pour les années 2011,2015et 2016	64

Liste des tableaux

La première partie : Etude bibliographique

II. *Notion de base sur le verre*

N°. tableaux		Pages
II.1	Les différents produits verriers	9

III. Le Procédé Float

N°. tableaux		Pages
III.1	Les différents formats de la feuille fabriquée du verre	14

V. Four de verrerie MFG

N°. tableaux		Pages
V.1	Les différentes sollicitations que subissent les réfractaires dans un four verrier	29
V.2	Différent types de réfractaire utilisée par MFG	29

La deuxième partie : ETUDE EXPERIMENTALE

N°. tableaux		Pages
1	Les exigences des matières premières du fabricant MFG	33
2	Les exigences des matières premières du fabricant MFG	33
3	Les exigences du charbon en (%) du fabricant MFG	34
4	Les exigences d'oxyde de fer en (%) du fabricant MFG	34
5	Le barème et la composition chimique des matières premières	34
6	La composition de verre	35
7	Calcul des quantités d'oxydes/Kg à partir de la composition chimique des matières premières	36
8	La relation entre la constante de vitesse de la fusion τ et la température de fusion t_{fusion}	37
9	Quantités de gaz libérés à partir des différentes matières premières	39

10	Les exigences (la consigne) d'usine MFG pour l'année 2007	42
11	les calculs thermiques des pertes énergétiques	43
12	Les calculs du débit spécifique de l'année (2011)	44
13	La consommation énergétique pour les tirées de 520T/J et 550T/J pour l'année 2011	45
14	La consommation énergétique pour l'année 2015	46
15	La consommation énergétique pour les tirées de 510T/J et 550T/J l'année 2015	46
16	La consommation énergétique pour l'année 2016	48
17	La consommation énergétique pour les tirées de 520T/J ,530T/J et 550T/J pour l'année 2016	48
18	Calcul du pourcentage des différents défauts du four de fusion	53
19	Résultats d'analyse granulométrique pour le sable	58
20	Moyenne de granulométrie du calcaire en (%) pour les années 2011,2015et 2016	60
21	Moyenne de granulométrie de la dolomie en (%) pour les années 2011,2015et 2016	61
22	Moyenne d'humidité du sable en (%) pour les années 2011,2015et 2016	62
23	Moyenne d'humidité du calcaire en (%) pour les années 2011,2015et 2016	63
24	Moyenne d'humidité de la dolomie en (%) pour les années 2011,2015et 2016	64

Résumé :

Ce mémoire rentre dans le cadre d'une étude du rendement thermique du four de verrerie de Mediterranean Float Glass **(**MFG) et l'influence de l'augmentation de la consommation énergétique sur la durée de vie de four, ainsi la qualité du produit fini dans une étude comparative entre différentes années d'exploitation (2011,2015 et 2016) en se basant sur le débit spécifique et le débit du gaz de combustion, car la distribution de la température dans le four à flamme doit également être maitrisée, à noter que la vie d'une usine de verre est calculée sur la vie de son four de fusion. Afin de bien savoir la situation réelle du four, l'étude de la consommation spécifique (débit de gaz) est nécessaire compte tenu du vieillissement du four et aussi l'influence de la granulométrie et l'humidité des matières premières au cours des années d'exploitation principalement le sable, la dolomie et le calcaire et même les courants convectifs sur la consommation énergétique. C'est pour ces raisons, l'étude s'inscrit dans la logique de vouloir améliorer le rendement de la production tout en veillant à obtenir un verre de qualité et en augmentant la durée de vie du four plus de la durée initialement prévue. Une fois que les causes de la détérioration du four ont bien été identifiés, on a proposer des solutions et des actions correctives au niveau de la ligne de production verre float pour réduire l'augmentation de la consommation énergétique, et ainsi la détérioration des briques réfractaires composant le four, ces dernières représentent la principale source de défauts solides rencontrés. Donc éviter ainsi des pertes qui peuvent se chiffrer à plusieurs millions de dinars par mois.

Mots-clés :

Verre float, four à flamme, consommation énergétique, débit spécifique, débit du gaz, granulométrie, humidité, courants convectifs, défauts.

Abstract:

This memory comes with the framework of studying the thermal efficiency of the glass furnace Mediterranean Float Glass (MFG) and the influence of the increase in energy consumption on the oven life and the quality of the finished product in a comparative study between different operating years (2011, 2015 and 2016) based on the specific flow rate and flow of combustion gases, as the temperature distribution in the flame furnace must be mastered, noted that the life a glass factory is based on the life of its melting furnace. In order to know the real situation of the oven, the study of specific fuel consumption (gas flow) is necessary given the aging of the furnace and also the influence of particle size and moisture of raw materials over the years operating mainly sand, dolomite, limestone and even convective currents on energy consumption. This is why the study is part of the logic of wanting to improve the production efficiency while ensuring get a glass of quality and increasing the life of the furnace over the initial duration. Once the causes of the deterioration of the furnace have been identified, may in proposing solutions and corrective actions at the float glass production line to reduce the increase in energy consumption and thus the deterioration of refractory bricks component the oven is the main source of solid faults encountered, and avoid losses that may total several million dinars per month.

Keywords:

Float glass, flame furnace, energy consumption, specific flow rate, gas flow rate, particle size, moisture, convective currents.

ملخص:

تأتي هذه المذكرة في إطار دراسة الكفاءة الحرارية للفرن للزجاج المصقول وتأثير الزيادة في استهلاك الطاقة على الحياة الفرن ونوعية المنتج النهائي تتم هذه دراسة على مقارنة بين سنوات التشغيل المختلفة (2011،2015 و 2016) اعتمادا على معدل تدفق الحراري وتدفق غازات الاحتراق، يشار إلى أن الحياة مصنع الزجاج يستند على الحياة الفرن. من أجل معرفة الوضع الحقيقي للفرن، يجب دراسة استهلاك الوقود (تدفق الغاز) ضرورية للفرن وأيضا تأثير حجم الجسيمات والرطوبة من المواد الخام المتمثلة أساسا في الرمل والدولوميت والحجر الجيري وحتى التيارات الحمل الحراري في استهلاك الطاقة.السبب في تحسين كفاءة الإنتاج مع ضمان الحصول على منتج عالي الجودة وزيادة الحياة الفرن. ان التعرف على الأسباب التي أدت إلى تدهور الفرن، قد تكون في اقتراح الحلول والإجراءات التصحيحية عند إنتاج الزجاج المصقول للحد من الزيادة في استهلاك الطاقة، وتجنب الخسائر التي قد مجموع عدة ملايين دينار شهريا.

الكلمات المفتاحية :

الزجاج المصقول، استهلاك الطاقة،معدل تدفق الحراري،معدل تدفق الغاز،حجم الجسيمات، الرطوبة،التيارات الحمل الحراري.

INTRODUCTION GENERALE

Bien que le verre soit connu depuis plusieurs millénaires. De nos jours, il trouve toute sa place dans la technologie des matériaux. Il a conquit de nouveaux marchés et a conservé toute sa vitalité. Les domaines de l'électronique et des communications, avec l'utilisation des fibres optiques, les matériaux semi-conducteurs, les circuits optoélectroniques, les lasers et d'autres nombreuses applications sont très porteurs. Le secteur de l'énergie, avec les panneaux solaires, le stockage de déchets dangereux et la protection thermique est aussi intéressant. Il est tout simplement incontournable et pas très cher. D'où son large emploi dans tous les domaines, il est de plus en plus répandu, notamment le verre plat, qui est un matériau de choix dans le secteur du bâtiment. Mais si son utilisation a connu un essor remarquable, c'est bien grâce aux avancées technologiques en matière de procédés d'élaborations.

C'est dans le four de fusion que se réalise le processus d'élaboration du verre à partir du mélange vitrifiable; celui-ci est obtenu par un mélange intime des matières premières préalablement dosées, auquel on ajoute le verre broyé appelé calcin. La durée de vie d'un four de fusion est limitée et il peut se dégrader et se détériorer avant la durée prévenu si on ne savait pas comment le maintenir. En général, on joue sur la consommation énergétique (débit du gaz) pour minimiser cette dégradation et dans ce concept, ce mémoire représente une restitution d'un travail de trois mois effectué au niveau de l'entreprise Mediterranean Float Glass (MFG), qui se situe à l'Arabaa dans la wilaya de Blida. Cette filiale du groupe Cevital algérie est spécialisée dans la fabrication du verre plat et est actuellement leader dans ce domaine au niveau national où 80% de sa production est destinée à l'exportation.

Mon stage de fin d'étude s'est déroulé au niveau du la 1 ère ligne de production du verre float, sur la problématique du rendement thermique (débit spécifique) de la 1ere ligne float et l'amélioration à apportée pour optimiser la consommation énergétique du gaz, et donc garder le bon fonctionnement du four et aussi l'optimisation des paramètres de fusion afin d'améliorer la production.

Dans ce travail, nous présentons les études effectuées au niveau du la 1 ère ligne du production verre float, en utilisant les méthodes d'analyse et de caractérisation misent à notre disposition par l'entreprise, afin d'identifier les paramètres qui influent sur l'augmentation de la consommation énergétique et la qualité du produit fini et de proposer des actions correctives au niveau de la ligne pour augmenter la durée de vie du four pour 3 ans encore (en plus de la durée initialement prévue), tout en minimisant les défauts du produit fini provenant du four de fusion.

Ce travail s'intègre dans une approche expérimentale d'étude de la consommation énergétique et comporte deux parties :

La première Partie de ce mémoire expose un rappel théorique dans un premier temps, sur les notions de base concernant le verre, sa structure qui comporte les oxydes formateurs, les oxydes modificateurs et intermédiaires, la différence entre un cristal et un verre en se basant sur la transition vitreuse, les différents types de verres industriels, le procédé float de fabrication du verre plat et les différentes étapes de ce dernier , les différents types des fours de verrerie ; et comme notre étude est basée sur le four de fusion, ceci va nous conduire, dans un deuxième temps à la description du four de verrerie de MFG type « four à flamme avec brûleurs transversaux », d'un point de vue de sa conception, les divers zones du fusion, ainsi que les différentes sollicitations exercées sur les réfractaires.

La deuxième Partie présentera l'étude expérimentale ainsi que les résultats et les interprétations, nous aborderons dans cette dernière d'une part, nos calculs de la consommation énergétique (débit spécifique) par deux méthodes : par la composition chimique, et le débit de gaz (CH_4) en comparant les résultats trouvées par ces deux méthodes, et d'autre part, une étude sur l'influence des paramètres du régime thermique (débit spécifique) sur la qualité du produit qui sont : les courants convectifs qu'on doit contrôler et stabiliser en fixant les températures de la cuve, la dégradation du four, la granulométrique des matières premières (sable, calcaire, dolomie) qui doit être dans les exigences pour donner une meilleure qualité du verre, en minimisant la consommation du gaz, ainsi que l'humidité des matières premières (sable, calcaire, dolomie) qui va être détaillée dans cette dernière partie.

Enfin, une conclusion générale englobant des recommandations et solutions proposées vont clôturées ce mémoire.

La première partie:

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I. Présentation du lieu du stage :

Mediterranean Float Glass par abréviation **(MFG)** est crée en Avril 2007, mais y'est inaugurée le 28 mai 2007. C'est une filiale du groupe CEVITAL, premier groupe industriel privé en Algérie. Elle est la plus grande ligne de production en Afrique et l'unique producteur du verre plat au niveau maghrébin, d'une capacité de 600 tonnes par jour pour la première ligne du verre float, et 800 tonnes par jour pour la deuxième. Depuis septembre 2007, l'entreprise travaille avec trois équipes (3*8) pour atteindre une production de 760000 tonnes/jour.

1. Localisation :

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

2. Les effectifs de MFG:

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

3. Développement:

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

En Décembre 2009 : une ligne de verre feuilleté.

Le mois de Septembre 2011 : une ligne de verre à couches tendres.

Le début Octobre 2010, MFG a mis en place une unité de transformation des produits verriers pour couvrir le marché algérien, notamment, en double vitrage isolant destiné aux fenêtres et aux façades des bâtiments.

MFG répond aussi aux besoins de plusieurs secteurs économiques tels que le BTP, l'électroménager, l'énergie, les panneaux solaire, le mobilier urbain et domestique.

Depuis 2008, MFG a un système de management intégré QHSE et est certifiée sous trois référentiels :

- ISO 9001 : pour la qualité en 2008
- ISO 14001 : pour l'environnement en 2004.
- OHSAS 18001: pour la santé et la sécurité de ses employés en2007.
- ISO 9001: pour le management des projets en 2011.

4. Distribution:

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

5. Organisation structurelle de MFG :

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

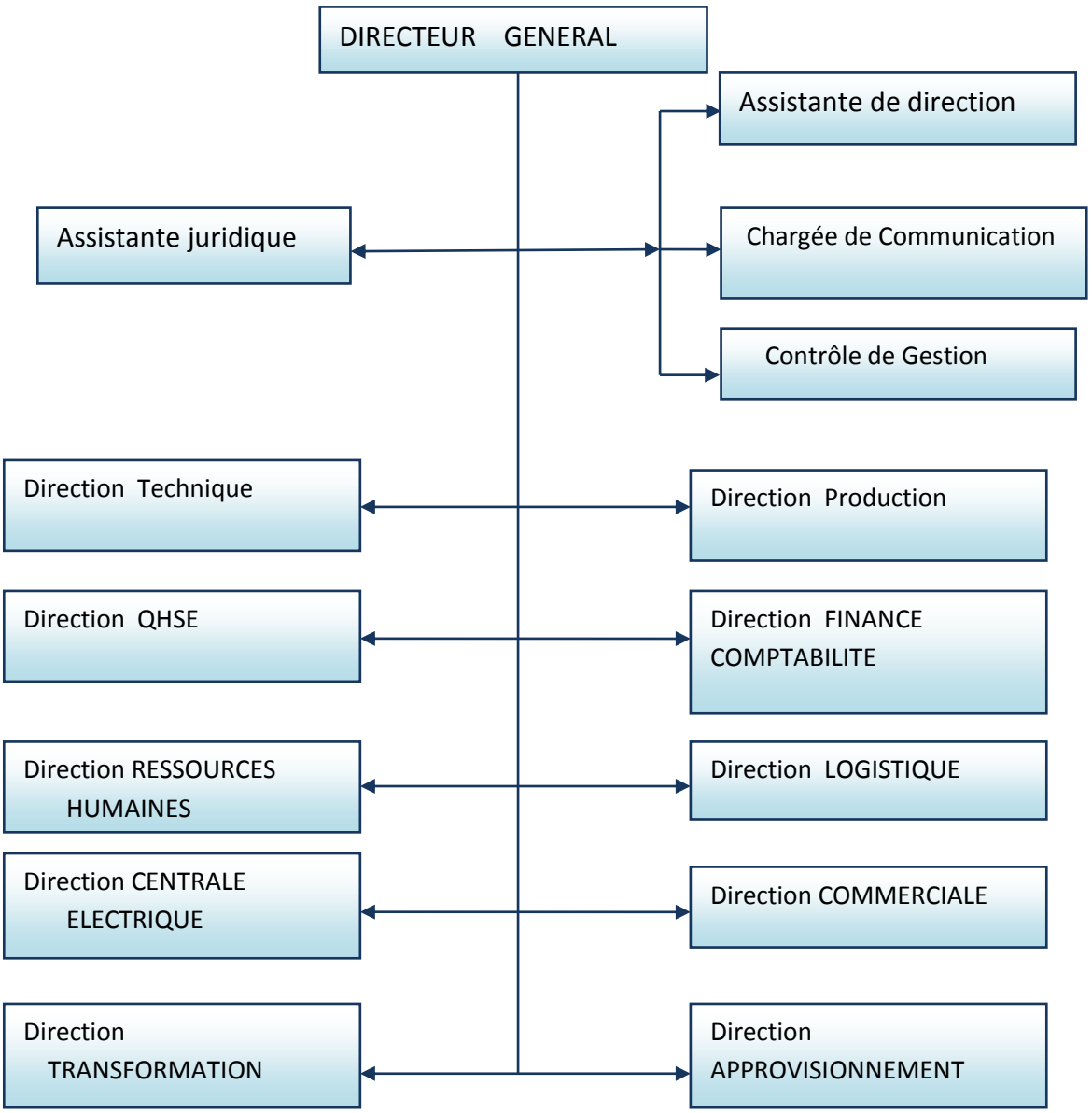


Figure I.1 : Organigramme générale du MFG.

II. Notions de base sur le verre :

I. Histoire sur verre :

Le verre existe déjà naturellement depuis plusieurs centaines de milliers d'années. L'homme du préhistorique l'utilisa, pour la première fois, il y a 100 000 ans sous forme d'obsidienne (verre naturel d'origine éruptive) ; Après sa découverte, il s'est familiarisé avec ce matériaux et a promotionné son utilisation dans tous les domaines, pour fabriquer des outils, des armes coupantes et des bijoux **[1]**.

Les premiers verres fabriqués par l'homme sont originaires de Mésopotamie, de Syrie puis d'Égypte, des potiers Egyptiens ont fabriqué le premier verre tout à fait, par accident, en cuisant leurs poteries. Le premier verre était un émail, mélange de sable et d'autres minéraux fondus sur la surface d'objets en céramique. Il y a trois mille ans, des artisans découvrirent que si l'émail avait une épaisseur suffisante, il pouvait servir seul à fabriquer des objets sans pour autant qu'il soit supporter par la terre cuite. Ils ne sont pas encore transparents ou translucides mais opaques, de couleur verte ou bleue. Le verre transparent a été découvert à Sidon (Phénicie), probablement à cause de la pureté des sables de la région **[2]**.

En Ve et Xe siècle est apparue la fabrication de verre plat soufflé, cette fabrication se faisait par deux techniques à savoir:

- **L**e 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.

- **L**e 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.

II. Définition du verre :

La plus part des scientifiques considèrent le terme "verre" comme: « Tous les solides non-cristallins qui montrent une transition vitreuse », quelque soit leur mode de fabrication **[3]**. *Gustav Tammann* **[4]** définit le verre comme suit: « L'état vitreux est l'état figé d'un liquide en surfusion, qui se solidifie sans cristalliser ». D'autres définitions ont été proposées par des sociétés et organisations de normalisation **[5,6]**.

Donc, le verre est un solide amorphe, sans ordre à longue distance et sans périodicité dans l'arrangement des atomes (figure II.1). C'est un matériau ou un alliage dur, fragile (cassant) et

transparent au rayonnement. Le plus souvent, il est constitué d'oxyde de silicium (silice SiO_2) le constituant principal du sable et de fondants.

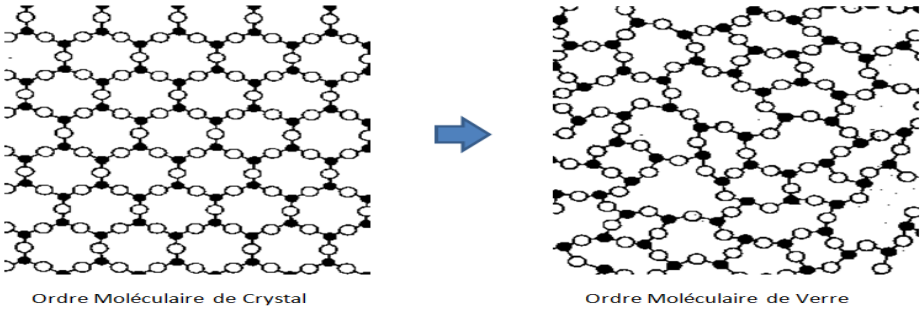


Figure II.1 : Représentation bidimensionnelle de a) la structure de la silice cristalline et b) d'un verre silicaté selon Zachariasen. ●: Si, □: Oxygène [7].

III. Transition vitreuse :

Le verre est un solide non cristallin présentant le phénomène de transition vitreuse. L'état physique correspondant est appelé l'état vitreux **[7]**.Le phénomène de transition vitreuse peut s'expliquer en suivant l'évolution d'une caractéristique physique du verre, comme son volume spécifique ou son enthalpie en fonction de la température.

Dans le cas normal, il se produit à la température de fusion T_f une cristallisation accompagnée d'une diminution de volume brutale **[8]**. Si à T_f , il ne se produit aucune cristallisation, le volume continue de décroître en suivant la courbe d'équilibre en trait discontinu (figure II.2). Ce domaine du liquide surfondu se trouve donc encore en équilibre thermodynamique, lorsque la température diminue encore, la courbe s'infléchit pour suivre ensuite un tracé sensiblement parallèle à celui du cristal. Ce nouvel état hors d'équilibre thermodynamique apparaît à la température de transition vitreuse (Tg) et pour une viscosité constante, quelle que soit la composition du liquide $\eta_g = 10^{12}$ Pa.s.

La transition vitreuse se produit à une viscosité d'autant plus élevée (à une température d'autant plus basse) que le refroidissement (ou le chauffage) est lent.

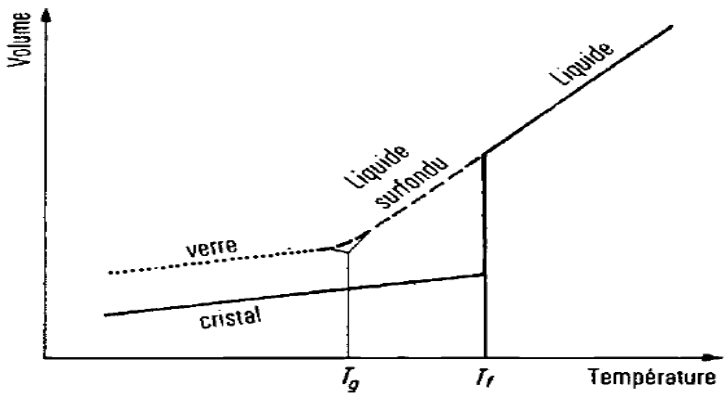


Figure II.2 : Genèse de l'état vitreux.

IV. Structure du verre :

IV.1. Oxydes formateurs :

Les premiers travaux qui ont eu du succès pour classifier les matériaux en **formateurs de verre** et non formateurs ont été publiés par Zachariasen en 1932 **[9]**. Il a suggéré que seuls cinq oxydes peuvent former des verres tels que : SiO_2, GeO_2, B_2O_3, As_2O_3 et le P_2O_5. Chacun de ces cinq oxydes peut former seul un verre, comme il peut donner du verre avec un autre ou plusieurs autres oxydes, qui ne sont pas eux-mêmes des formateurs de verre.

L'oxyde de silicium SiO_2 est le meilleur oxyde formateur dans l'industrie verrière car il se trouve abondamment dans la nature sous forme de sable (quartz). Les sables utilisés dans l'industrie verrière contiennent plus de 99% de SiO_2 avec un taux d'impuretés inférieur à 0,2% **[10]**. Chaque molécule de silice est identique (tétraèdre) mais où l'organisation des unes et des autres est inexistante. Cette fausse organisation se situe entre celle des solides (ordonnée donc cristallisée) et celles des liquides (en mouvement donc amorphe). L'état vitreux est cet état solide amorphe (non cristallisé) caractérisé par la distribution désordonnée des molécules, qui conservent néanmoins des distances fixes entre elles (figure II.3).

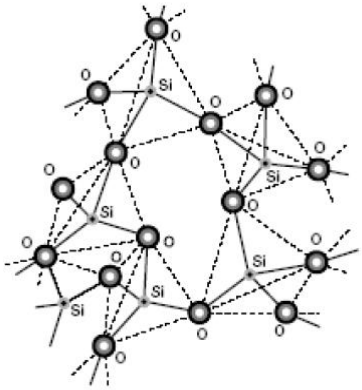


Figure II.3 : Représentation schématique de la structure de verre de silice [11].

IV.2. Oxydes modificateurs :

Les oxydes alcalins introduisent des discontinuités dans le réseau de silice et entraine une réduction de la viscosité **[12]**. Les oxydes alcalino-terreux sont aussi des modificateurs de réseau, mais ils sont plus réfractaires que les oxydes alcalins et donc favorisent moins à la formation vitreuse.

Dans l'industrie verrière, pour abaisser de plusieurs centaines de degrés la température d'élaboration et de vitrification de la silice, des oxydes alcalins comme le sodium Na_2O et le potassium K_2O, appelés « **soude** » et « **potasse** », sont introduits sous forme de « **fondants** ».

Une partie de Na_2O est introduite sous forme de sulfate: le sulfate de sodium se décompose à haute température libérant des bulles de SO_2 qui facilitent l'affinage. Le nitrate NO_3 est ajouté pour ses propriétés oxydantes. Le K_2O, plus cher, est utilisé dans les verres au plomb **« cristal »** et certains verres colorés. La chaux CaO est un composant important qui assure la stabilité des verres courants. Elle est introduite sous forme de carbonate de calcium, les calcaires, ou associée à la magnésie MgO dans la dolomie **[10]**.

IV.3. Oxydes intermédiaires :

Ils peuvent jouer le rôle de formateur ou modificateur de réseau selon la composition du verre. Certains constituants sont ajoutés en très faibles quantités (<1%) pour modifier les conditions d'élaboration ou la coloration du verre ou bien faciliter l'affinage.

V. Différents types de verre industriel :

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

V.1. Verres plats :

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

V.2. 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 de verre fondu est introduite dans un moule et pressée vers 400-450°C. Les moules sont en acier spécial et leurs surfaces souvent chromées. Les presses à main permettent de fabriquer jusqu'à 300 pièces/heure et les presses automatiques (comportent une série de moules) jusqu'à 1000 pièces/heure. Le procédé primitif de soufflage à la bouche, encore pratiqué dans la verrerie d'art ou scientifique a été mécanisé pour augmenter les rendements **[10]**.

V.3. Fibres de verre :

Elles sont obtenues par l'étirage de verre fondu, jusqu'à ce qu'elle présente un diamètre compris entre 0,5 et 15 µm. Il est possible de fabriquer des fils longs, continus et multifilaires aussi bien que des fibres courtes de 25 à 30 cm de long. Tissées dans certains textiles, les fibres de verre constituent d'excellentes étoffes et de très bons matériaux d'ameublement grâce à leur stabilité chimique, leur solidité et leur résistance au feu et à l'eau.

Les fibres de verre seules, ou associées à des résines, forment d'excellents isolants électriques. En imprégnant les fibres de verre de plastique, on obtient une fibre de verre mixte qui allie la solidité et l'inertie du verre à la résistance aux chocs du plastique.

Parmi les procédés de fabrication des fibres de verres, il y a l'étirage mécanique à grande vitesse, la vitesse déterminant le diamètre des fibres qui est compris entre 1 et 8 µm. Ces fibres sont destinées à l'ameublement, au renforcement de matière plastique ou du caoutchouc, du plâtre, du papier, à l'isolement électrique ou à la fabrication de tissus industriels **[11]**.

Le tableau N°II.1 résume les différents produits verriers utilisées dans des divers domaines.

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

Tableau N°II.1 : Les différents produits verriers [3].

III. Le procédé Float :

Les traitements de la surface (doucissage, polissage) du ruban de verre sont des opérations coûteuses et nécessitent de lourds investissements. Pour résoudre ces problèmes, Alastair Pilkington **[13]** avait développé en 1952 un nouveau procédé, qui est appelé « Float- Glass », lorsque le verre fondu est flotté sur un liquide.

I. Définition de verre float :

Le premier travail est du à M. Henry Bessemer qui obtint un brevet pour un procédé de production du verre sur un lit de métal fondu. Le système de production actuelle se base sur le dispositif breveté par Sir Alastair Pilkington **[13].**

Le verre float est un type de verre fabriqué par flottage sur un lit de métal fondu, (généralement l'étain), le plomb et d'autres alliages à bas point de fusion ont été utilisés dans le passé. Cette méthode donne à la feuille du verre une épaisseur uniforme et une surface très plane et un polissage ultérieur est inutile **[14,15]**. Afin d'éviter toute oxydation du bain, la production du verre se fait sous atmosphère contrôlée neutre ou légèrement réductrice.

Actuellement le procédé float est le plus utilisé pour produire du verre plat de haute qualité au niveau mondial, il remplace quasi intégralement les techniques d'étirages **[3].**

II. Matières premières pour la formation du verre Silicate Sodo-Calcique :

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

1. Sable (SiO_2) :

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

2. Carbonate de soude ($Na_2\ CO_3$) :

C'est la source principale d'oxyde de sodium Na_2O, qui est l'alcalin le plus employé comme un oxyde modificateur, qui dépolymérise le réseau des oxydes formateurs, abaisse la température de fusion, augmente le coefficient de dilatation,et la conductivité électrique **[16]**.

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

L'oxyde de magnésium (MgO) est mis essentiellement afin d'éviter la dévitrification. Aussi, le MgO est un meilleur stabilisant pour le verre que CaO **[17]**.

4. Calcaire ($CaCO_3$) :

L'introduction de CaO dans le verre entraîne l'amélioration de la résistance à l'attaque chimique et l'augmentation de la densité, du coefficient de dilatation thermique et de l'indice de réfraction. Cependant, il décroit la résistance mécanique **[17].**

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

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

6. Sulfate de sodium (Na_2SO4) :

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

7. Charbon :

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

8. Oxyde de fer :

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

9. Calcin :

L'emploie du calcin a une grande importance car la fusion de ce dernier consomme moins d'énergie que le mélange vitrifiable **[18]**.

III. Le procédé de fabrication de verre float :

La fabrication du verre float (figure III.1) passe par quatre étapes :

-Fusion.
-Formage.
-Recuison.
-Découpage.

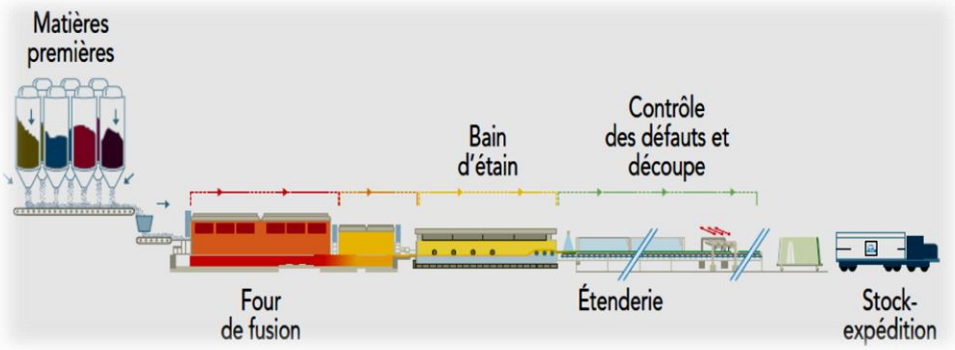


Figure III.1: Schéma du procédé float [3].

III. 1. Fusion :

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

La fusion est suivie par un affinage au cours duquel disparait les bulles de gaz grâce à des substances en faible concentration, et enfin un conditionnement thermique qui sert à abaisser la température du verre, et stabiliser le régime thermique dans le four ; et donc à la diminution des défauts et à l'augmentation de rendement.

III.2. Mise en forme du verre float :

III. 2.1.Principe :

Le verre liquide est dirigé sur un bain d'étain liquide. Le fait de flotter librement sur la surface absolument plane du bain d'étain allié à un chauffage simultané de la surface supérieure (poli naturel) permet d'obtenir une feuille de verre aux faces parallèles, similaire à un miroir. Des rouleaux, appelés Top Rolls (figure III.2), permettent de définir l'épaisseur du verre.

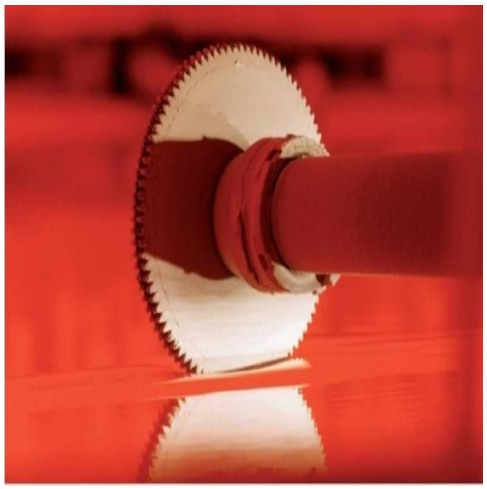


Figure III.2: Top Roll en contact avec le ruban du verre.

III.2.2. Bain d'étain :

C'est un système étanche avec une atmosphère contrôlée composée d'azote et d'hydrogène. Il se compose d'une structure en acier, d'une enveloppe métallique supérieure, d'une enveloppe métallique inférieure protégée de l'étain par des réfractaires spéciaux et de systèmes de contrôle de la température du ruban de verre et du formage (figure III.3).

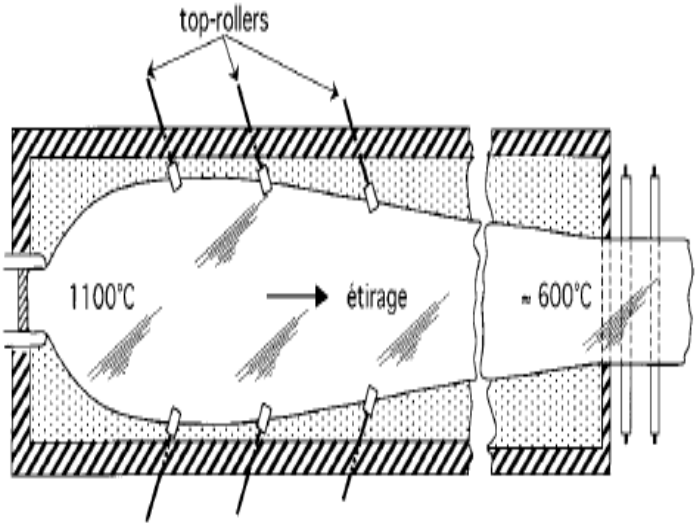


Figure III.3: Schéma d'une série du Top Rolls (vue de l'intérieure)

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

Des résistances électriques (figure III.4), regroupées en zones de chauffage, permettent une régulation fine de la température du verre qui est progressivement réduite. Pour un débit de verre fixé et une largeur imposée de la feuille, son épaisseur est déterminée par les Top Rolls

Figure III.4: Résistances électriques du bain d'étain.

III.3. Recuit du verre float :

Après le bain d'étain, le ruban de verre passe dans un couloir de refroidissement appelé etenderie, dont la longueur dépasse 119,25 mètres. Il est refroidi 600 à 60° C environ.

Ce refroidissement lent et contrôlé évite toute formation de tensions internes. C'est un élément important dont dépend la qualité du traitement ultérieur **[19].**

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

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

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

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

III.4. Découpe du verre float:

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

Le verre est ensuite débité et empilé, en plaques standards de 6000 x 3210mm. Le verre peut également être directement préparé aux dimensions souhaitées par le client à l'aide d'une ligne de coupe séparée **[19].**

Les épaisseurs qui peuvent être produites peuvent varier de 3 à 19mm avec les formats donnés dans le tableau N° III.1 suivant:

Format	***PLF***	***DLF***	***DDLF***	***DDLF***
Dimension (mm x mm)	***3210x6000***	***2250x 3210***	***1605x 2100***	***1605x 2400***

Tableau N°III.1 : Les différents formats de la feuille fabriquée du verre.

IV. Type des fours de verrerie:

I. Généralités :

Le verre est obtenu par un mélange intime des matières premières préalablement dosées. Ce mélange vitrifiable est appelé « **composition** » par les verriers **[20]**. Le four de fusion reçoit ces matières premières destinées à l'élaboration du verre et il fournit l'énergie nécessaire aux différents processus de formation du mélange vitrifiable.

Les fours de verrier sont les cerveaux des lignes de production du verre suivant deux principes : soit de façon séquentielle dans des fours à pot, soit de façon continue dans des fours à coulée continue. Nous nous limitons uniquement à la deuxième catégorie de fours qui est de loin la plus répandue aujourd'hui.

En fonction du mode de chauffage, on peut classer les fours de fusion de coulée continue en deux grandes catégories :

- les fours à flammes: utilisant des combustibles fossiles, dans lesquels l'énergie thermique est transmise au verre par échange thermique entre les flammes et la surface du bain de verre;
- les fours électriques : dans lesquels l'énergie thermique est produite par effet Joule dans la masse du verre en fusion **[20]**.

II. Classes des fours de verrerie de coulée continue :

II.1 Fours à flammes:

II.1.1 Conception générale :

La gamme de production des fours à flammes est très étendue généralement, puisqu'elle va de 5 à 1000 tonne par jour (t/j).

Les principaux éléments d'un four à flammes sont :

- le bassin de fusion;
- l'avant-bassin;
- le système de chauffage;
- le dispositif d'enfournement de la composition;
- un dispositif de dépollution des fumées.

La **cuve** en réfractaires, contenant le verre en fusion (figures IV.1 et IV.2), comporte deux compartiments distincts :

- le **bassin de fusion**, à l'extrémité duquel est enfournée la composition et dans lequel se font la fusion, l'affinage et l'homogénéisation;
- l'**avant-bassin**, appelé aussi bassin de travail ou distributeur.

Dans la plupart des fours, ces deux parties sont complètement distinctes et reliées entre elles par un conduit appelé « **gorge** » (figures IV.1), qui est situé au niveau de la sole du bassin de fusion ou à un niveau inférieur.

Dans le cas du verre plat (procédé « Float »), la séparation entre les deux bassins est constituée par un rétrécissement appelé « **corset** ».Cet avant-bassin, appelé également « **bassin de braise** », alimente directement le bain d'étain sur la surface duquel s'étale le verre, donnant à la feuille sa largeur et son épaisseur définitives. Après la fusion et le formage, le verre se refroidit progressivement et se solidifie avant de traverser l'étenderie de recuisson.

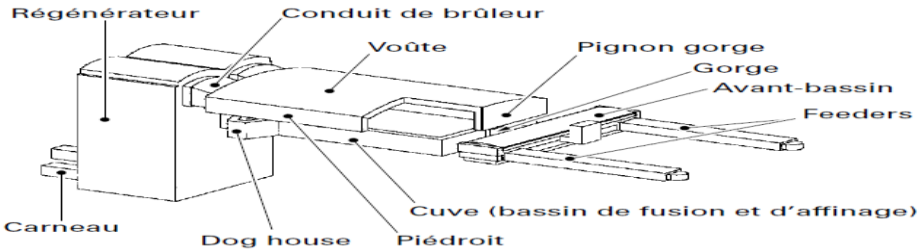


Figure IV.1: Four pour verre creux. Régénérateurs, flammes en boucle.

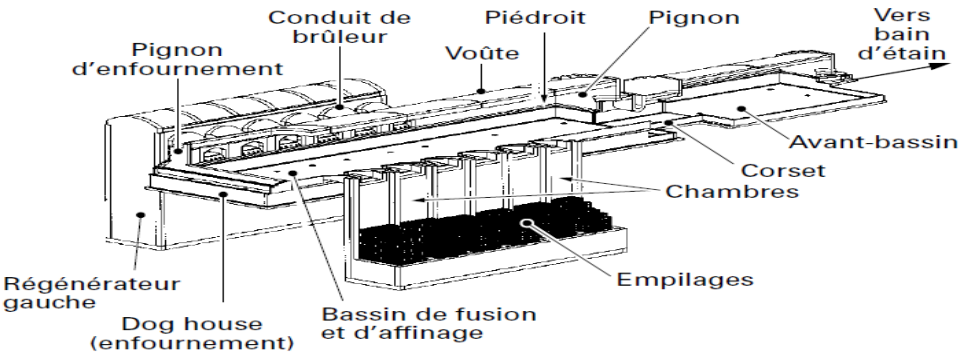


Figure IV.2 : Four « float »,Régénérateurs ; brûleurs latéraux.

II.1.2 Classification :

Les fours à flammes sont généralement classés par leur système de combustion :

- four à brûleurs à air froid;
- four à régénérateurs;
- four à récupérateur métallique;
- four utilisant de l'oxygène (oxycombustion).

II.1.2.1 Four à brûleurs à air froid :

Ce four chauffé par des brûleurs alimentés en air froid, est généralement connu sous le nom de four « unit Melter », nom commercial déposé par la Société Emhart (États-Unis). Il offre une

grande flexibilité mais il n'existe pratiquement plus de fours de ce type en service, ceux qui subsistent ayant été modifiés par l'adjonction d'un récupérateur métallique. La figure IV.3 donne le schéma de principe d'un tel four.

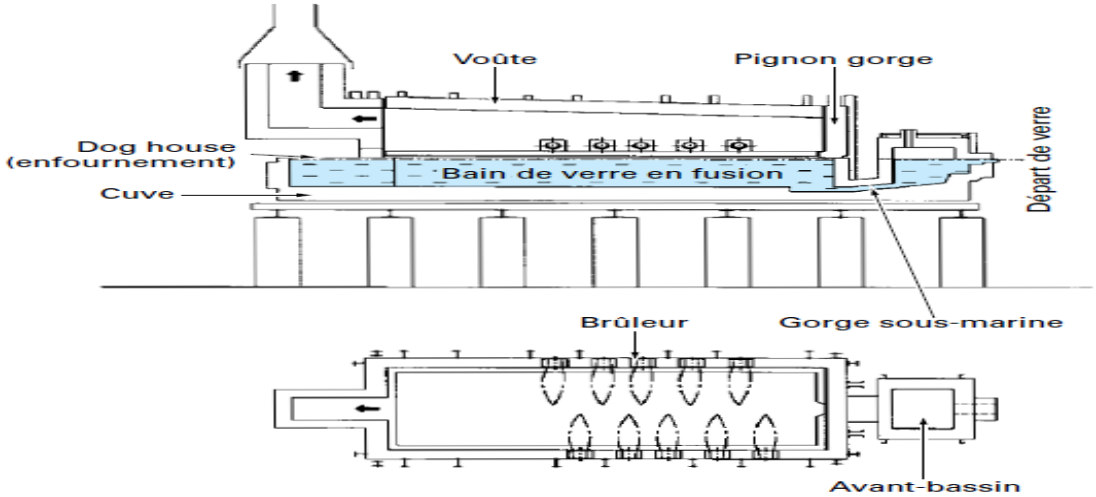


Figure IV.3 : Four à brûleurs à air froid, type Unit Melter.

II.1.2.2 Four à régénérateurs :

Le four à régénérateurs ou four à inversion, est équipé de deux séries d'orifices appelés colliers de brûleurs, et qui sont localisés dans les piédroits ou dans le pignon du four. Ces orifices fonctionnent alternativement :

- soit comme départ de fumée ;
- soit comme arrivée d'air de combustion.

L'intervalle entre deux inversions se situe entre 20 et 30 min. Des conduits (figures IV.1 et IV.2) relient les colliers de brûleurs à deux ensembles de régénérateurs constitués par des chambres en maçonnerie (voir annexe n°1) à l'intérieur desquelles sont installées des pièces en réfractaires, « l'empilage » au travers duquel circulent soit les fumées, soit l'air de combustion à réchauffer. Malgré le développement d'autres types de four, celui-ci reste encore le plus utilisé, car le régénérateur est le seul dispositif permettant d'obtenir de l'air réchauffé à des températures de 1100- 1250 °C [1].

On distingue deux types de fours à régénérateurs :

- le four à flamme en boucle (brûleurs dans le pignon);
- le four à brûleurs transversaux (brûleurs dans les piédroits).

a. Four type à flamme en boucle :

C'est le four qui s'est le plus développé à partir des années 1970 dans l'industrie du verre (figure IV.4**)**. Il est très utilise pour élaborer le verre d'emballage, qui doit son nom à la trajectoire en U de la flamme **[2]**. Pendant longtemps, on a pensé qu'il n'était pas souhaitable de dépasser une

surface de 30-35 m^2 pour ce type de four. L'utilisation du fioul ou du gaz naturel, et les améliorations apportées aux injecteurs de combustible font, que l'on construit maintenant des fours de 150 m^2, qui permettent d'atteindre des productions de 300 à 400 t/j **[20]**. Ce four n'est équipe que d'une seule paire de régénérateurs qui communiquent avec le laboratoire du four par le pignon amont. Les caractéristiques techniques de ce type de four, conjuguées au fait que la qualité du verre à fournir est moins élevée que celle exigée pour le verre float, conduisent a des tirées spécifiques pouvant s'élever à quatre tonnes par jour et par mètre carré.

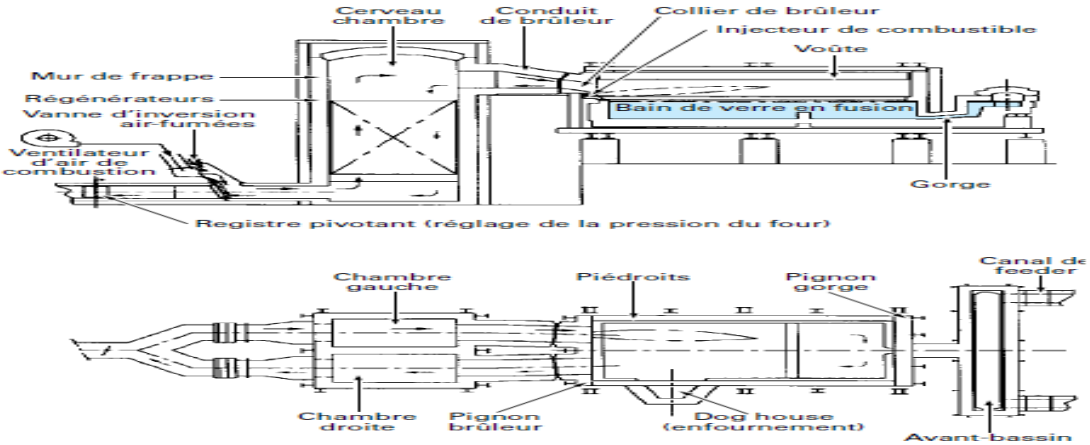


Figure IV.4: Four à régénérateurs, chauffage par flammes en boucle (Simple chambre).

b. Four type à brûleurs transversaux :

C'est le four à régénérateurs avec brûleurs transversaux, qui fut le plus utilisé en verrerie. Ce type de four est le plus grand four moderne de verrerie, qui produit jusqu'à 900 tonnes de verre float par jour avec une surface libre du bain de verre couvrant environ 400 m^2.

Actuellement, il est utilisé pour le verre « float » ou les verres spéciaux (verre pour écran de téléviseur), lorsque l'on attache une grande importance au fait de pouvoir régler la combustion dans les différentes zones du four. La figure IV.5 donne des schémas de ce type de four.

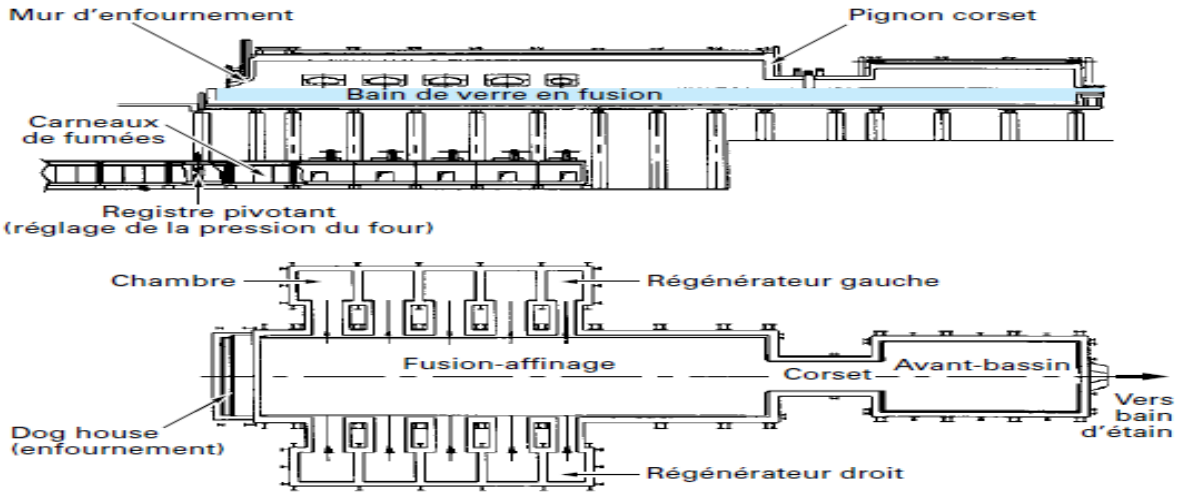


Figure IV.5 : Four « float » à régénérateurs.

Il existe d'autres types de four moins répandus que les précédents qui différent par le système de récupération de la chaleur ou encore par le comburant qui peut être de l'oxygène pur. Ces derniers sont décrits en annexes n°2 selon la référence **[1, 2, 3]** où les lecteurs intéressés pourront s'y reporter.

II.2 Les fours électriques :

Les fours verriers électriques (figure IV.6) sont des fours à bassin et souvent appelés aussi « four à voute froide ». Le courant est introduit dans le bain par un jeu d'électrodes de molybdène, qui peut supporter des températures de 1700 °C. Le verre fondu, soutiré par une gorge, arrive dans un second compartiment, ou s'effectue l'affinage puis le conditionnement thermique.

L'introduction directe de l'énergie à la masse du verre assure un excellent rendement énergétique (environ 1 kWh par kg de verre) qui est meilleur que les fours à flammes. Cependant, ce type de four est pénalisé par le cout de l'énergie électrique. La fusion électrique est appliquée pour élaborer du verre ordinaire, verre opale au fluor et du cristal au plomb **[13]**.

L'absence de flammes a pour conséquence un très faible taux de pollution en NO_x et SO_x. Un défaut du four électrique est sa vie brève due aux températures élevées dans la sole et dans la gorge **[21]**.

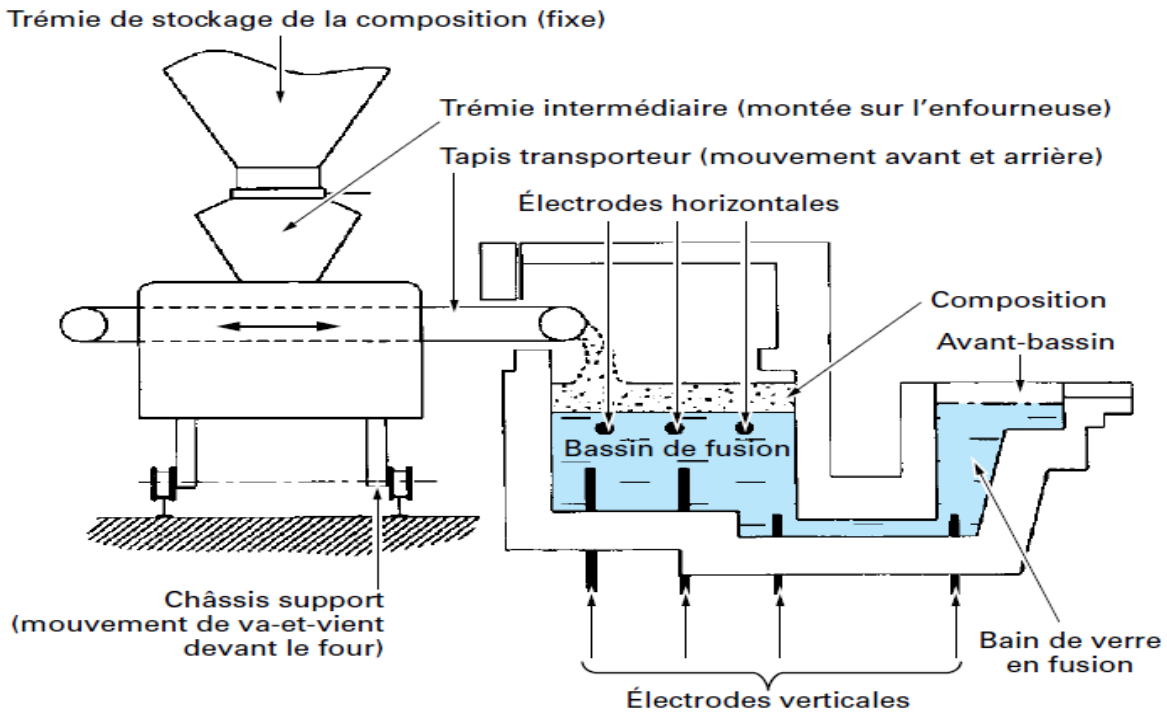


Figure IV.6 : Four électrique, électrodes en sole et parois [20].

V. Four de verrerie MFG :

I. Conception du four :

Le four de fusion du **Mediterranean Float Glass(MFG)** est un four à flamme transversale avec une capacité de fusion de 600 tonnes/jour. Dans ce type de four régénérateur à flamme transversal dans la ligne de production, est prévu 6 paires de brûleurs et en utilisant le gaz naturel comme combustible principal. Cette conception réponde aux différentes étapes d'élaboration du verre (figure V.1), qui se décompose en différentes phases (fusion, affinage, et conditionnement) auxquelles correspondent différentes zones : une zone d'enfournement, une zone de fusion, une zone d'affinage, la gorge (le barrage, le malaxeur), et une zone de conditionnement (bassin de repos).

Le four à régénérateurs à brûleurs transversaux est constitué essentiellement des briques réfractaires qui résistent à la chaleur, avec une couche externe des briques d'alumine qui minimisent les pertes de chaleur et soutenu à l'aide d'une structure en acier refroidie en permanence.

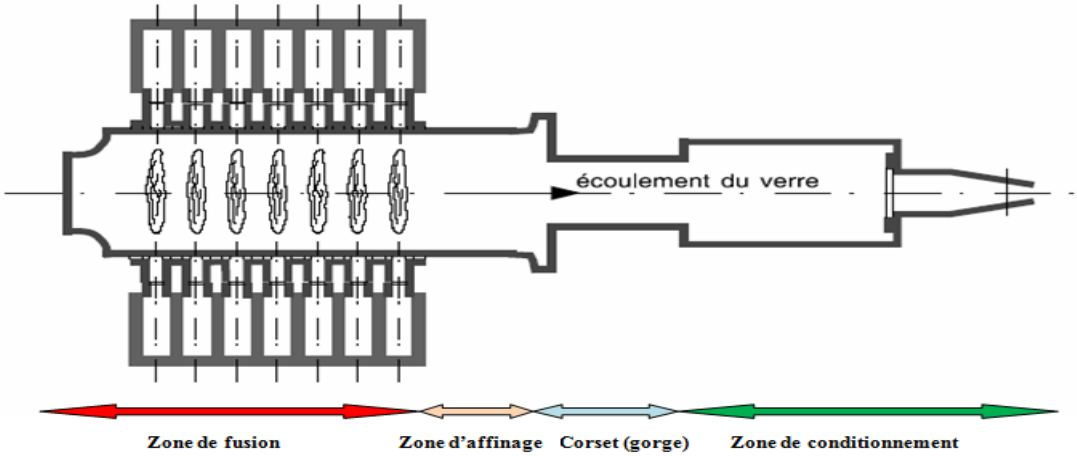


Figure V.1: Coupe du four à flamme transversale.

❖ Zones du four régénérateur à flamme transversal :

1. Enfournement :

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

2. Zone de fusion (figure V.2):

Lieu de transformation de la matière première en verre, elle s'étale depuis l'enfournement jusqu'au dernier pore. Elle comporte plusieurs parties complémentaires entre elles (corps de fusion, colliers brûleurs, chambres régénératrices, système d'inversion, carneaux principaux et secondaires), qui sont montrées dans la coupe transversale du four de la figure V.3 en dessous.

Figure V.2 : Chambre de fusion (four de l'industrie MFG).

1. Corps du four.
2. Colliers de brûleurs.
3. Chambres régénératrices.
4. Système d'inversion.
5. Carneaux principaux et secondaires.

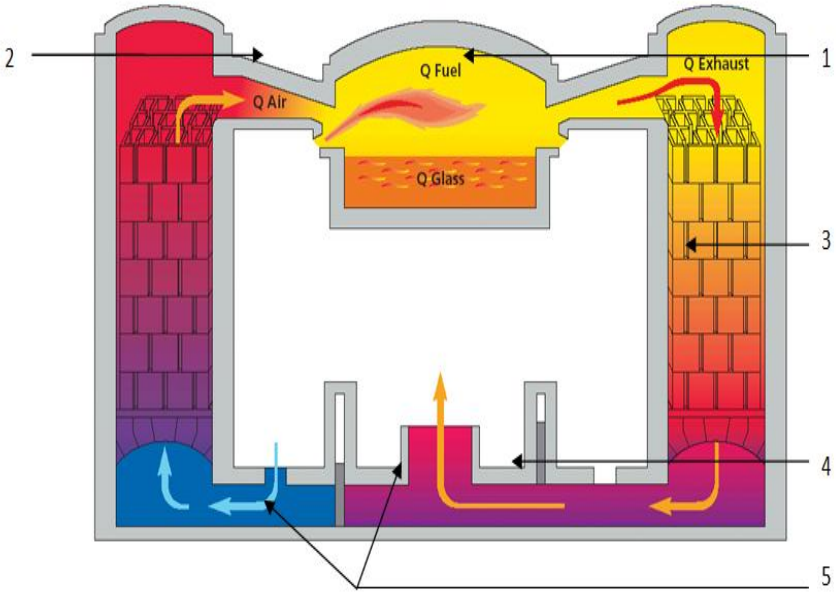


Figure V.3: Four à brûleurs transversaux (coupe transversale).

2.1 Corps de fusion :

C'est un bassin où se trouve le volume du verre généralement appelée paroi de cuve. Elle est constituée en briques AZS (alumine, zirconium 41%, silice), sur-plantée par une voûte en briques de silice. Sur chaque côté, il y a six chambres de régénération où ports, avec trois injecteurs à flamme horizontale et à haute pression. Sauf le 6^{éme} pore, où il y a deux injecteurs seulement. Ces injecteurs permettent l'introduction du CH_4 pour l'allumage des flammes qui peuvent atteindre une longueur de 8m, soit les trois quart (¾) de la longueur du four.

2.2 Chambres régénératrices :

Les chambres de régénération (voir annexe n°3) sont reliées au four par les **colliers de brûleurs**, qui sont conçu d'une couche interne de brique en silice et d'une couche externe de brique en alumine. Les colliers permettent la circulation de l'air (O_2) et l'évacuation des fumés vers l'extérieur. Les chambres de régénération sont conçues en briques d'empilage à l'intérieur qui supportent des températures atteignant les 1500°C (figure V.4 et V.5). Elles fonctionnent suivant l'allumage de la flamme, elle permet alimentation de la flamme en oxygène de sont coté, et du coté opposé, elle permet d'évacuer la fumée et maintenir la brique chaude par la chaleur, d'où le terme de régénérateur.

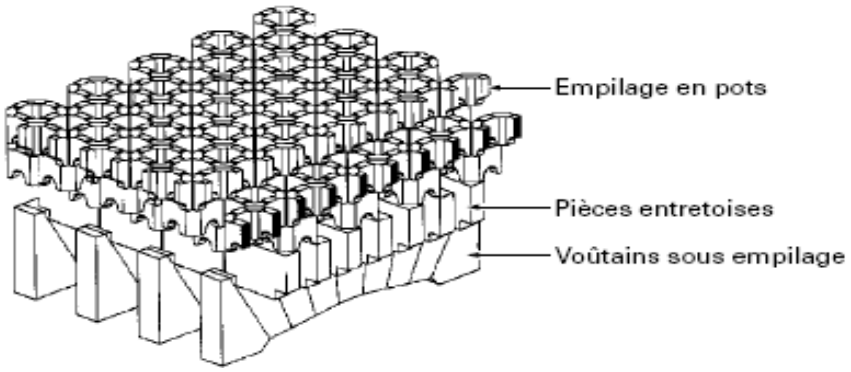


Figure V.4 : Brique d'empilage de la chambre régénératrice.

L'inversion est assurée par un système mécanique qui permet d'inverser la flamme de part et d'autre chaque 20min. Les fumées sont évacuées dans un long couloir appelé **carneau principal** vers une cheminée d'une longueur de 82.5mètres.

2.3 Système de régénérateurs :

L'empilage de briques réfractaires (figure V.5) traversées par de nombreux canaux où circulent alternativement les fumées et l'air de combustion : les fumées cèdent leur énergie aux briques qui la restituent lors du passage de l'air.

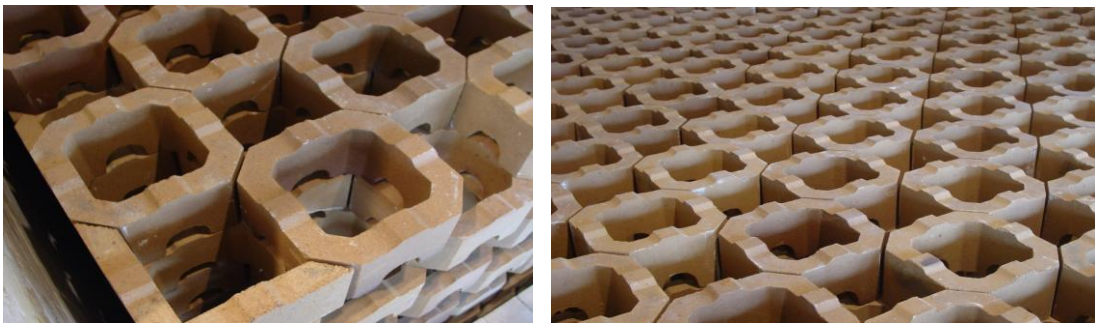


Figure V.5 : Photo des briques d'empilage du four MFG.

3. Zone d'affinage :

La zone d'affinage, d'une longueur de 16 mètres, s'étale du dernier port jusqu'à la gorge. Sa paroi est en brique AZS-36# (36% de Zr). Son rôle est le dégazage du verre, c'est-à-dire la libération des bulles d'air emprisonnées à l'intérieur comme l'oxygène (O_2) et le dioxyde de carbonne (CO_2).

4. La gorge :

C'est une réduction intermédiaire entre la zone d'affinage et la zone de conditionnement. Elle permet le réglage du débit du verre. Elle comporte un barrage, pour stopper les impuretés qui flottent sur la surface du verre et sept (07) malaxeurs (voir annexe n°4) qui assurent l'homogénéisation du liquide. Les briques de paroi sont en AZS-33# (33% de Zr).

5. Zone de conditionnement :

Sur une longueur de 16 mètres, elle s'étend de la gorge jusqu'au bain d'étain. Elle est aussi appelée zone de repos. Son rôle est de conditionner le verre à une température de 1100°C environ, pour pouvoir être façonné au bain d'étain. Le réglage de la température se fait par injection d'air. La brique de paroi est en corindon en 95% (Al_2O_3).

II. Processus de fusion du verre dans le four :

C'est la transformation que subit la matière première elle comporte cinq(05) étapes :

1. formation des silicates :

Elle s'établi à une température entre 800°C et 900°C par :

- **E**limination de l'eau présente dans la matière première par vaporisation dans le 1er port du four.
- **L**a dissolution des sels qui composent la matière première, et qui sont démontrés par les réactions suivante au niveau des trois premiers ports :

$Na_2CO_3 \rightarrow Na_2O+CO_2\uparrow$ 700ºC environs.

$CaCO_2 \rightarrow CaO+CO_2\uparrow$ 500ºC environs.

$MgCO_3 \rightarrow MgO+CO_2\uparrow$ 380ºC environs.

$Na_2SO_4 \rightarrow Na_2O+SO_2\uparrow$ 1200 ºC environs.

- **L**es différentes transformations des structures moléculaires (tirade, rotation…….etc.) subites par un gradient élevé de température.
- **F**ormation des silicates : Ils se forment suivant les réactions suivantes :

Pour Na_2CO_3 et de SiO_2 : $Na_2CO_3 + SiO_2 \longrightarrow Na_2SiO_3 + CO_2 \uparrow$

Pour Na_2SO_4 et de SiO_2: $Na_2SO_4 + SiO_2 + C \longrightarrow Na_2SiO_3 + CO_2 \uparrow + SO_2 \uparrow$

Pour $MgCO_3$ et de SiO_2 : $MgCO_3 + SiO_2 \longrightarrow MgSiO_3 + CO_2 \uparrow$

Pour $CaCO_3$ et de SiO_2 : $CaCO_3 + SiO_2 \longrightarrow CaSiO_3 + CO_2 \uparrow$

- **F**ormation des sels double : cette réaction se forme par fusion de deux sels ex : Na_2CO_3 et $CaCO_3$ formant $CaNa_2(CO_3)_2$, qui a pour rôle d'accélérer le procédé de fusion de la silice et de diminuer sa température de fusion.

2. Formation du verre :

C'est le passage de la matière de l'état solide à l'état liquide (fondu). Elle se passe au niveau du 4ème port à une température de 1575°C environ. Le processus de fusion des grains de la silice est très lent. La vitesse de formation de verre dépend de :

- la vitesse de fusion des grains de la silice;
- la température de fusion;
- la composition de verre;
- la granulométrie des sables ;
- l'humidité des matières premières.

3. Affinage du verre :

C'est le dégazage du liquide des bulles de gaz emprisonnées à l'intérieur à une température entre 1400 °C et 1500°C. Ces bulles proviennent de :

- Air de combustion ;
- Des gaz dégagé pendant la fusion ;
- De la variation de la composions chimique par l'influence de la température ;
- Des sels volatile (borate, chlorure, fluorure, sulfate, S, H_2, H_2S);
- Par le contacte du verre avec les parois, pots, cuves…..etc ;
- Par inclusion d'un solide dans le verre.

4. Homogénéisation :

Elle se fait généralement par différentes manières : soit par un courant de convection naturel, qui se fait pare différence de densité suivant la température et aussi peut se faire par un mouvement des bulles d'air (affinage), ou par action mécanique à l'aide d'un brassage mécanique avec les malaxeurs au niveau de la gorge.

5. Refroidissement :

Le refroidissement set à amener le verre à la viscosité exigée pour la mise en forme, ce qui permet en outre la dissolution des bulles restantes suivant le procédé de formage.

III. Circulation des fumées dans le four de fusion :

Globalement les fluides entrant dans le four par les brûleurs traversent le four et en ressortent par les carneaux et la cheminée. Ce circuit est donc défini par les données géométriques de la construction. Il doit être, dans la mesure du possible, organisé de manière telle que la charge soit bien en contact avec les gaz produits.

III.1 Les différents modes d'échange :

Généralement, Il existe trois modes d'échanges thermiques dans le four de fusion par conduction, convection et rayonnement.

1. Le rayonnement :

Considérons un corps porté à une température T. Ce corps émet de l'énergie par sa surface sous forme de rayonnement thermique, c'est-à-dire sous forme d'ondes électromagnétiques; cette énergie est émise suivant toutes les longueurs d'onde et toutes les directions. Si ce corps n'est pas seul dans l'espace, il reçoit également de l'énergie sous forme de rayonnement de la part des autres corps.

C'est le mode le plus présent dans le four de fusion, il représente 95% du transfert thermique, il s'effectue en deux temps :

- **E**ntre la flamme et la voute : les rayons sont émis vers la voute; une partie de ces rayons est absorbée et l'autre partie est reflétée vers la surface du verre.

- **E**ntre la flamme et le verre : elle s'effectue en deux lieux, quand le verre est encore une matière première : les rayons sont absorbés. Par contre, quand cette dernière devient un liquide vitreux, une partie des rayons est absorbée et l'autre est reflétée.

2. La convection :

Elle implique le transport de la chaleur par une partie d'un fluide, qui se mélange avec une autre partie. La convection concerne exclusivement les fluides (gaz ou liquides), puisqu'elle prend sa source dans un transport macroscopique de matière. Dans le four, la convection est négligeable à cause du rayonnement qui est le plus présent comme mode.

3. La conduction :

Elle est le mode de transfert de chaleur, provoqué par une différence de température, entre deux régions d'un même milieu ou entre deux milieux en contact sans déplacement appréciable de matière. C'est en fait l'agitation thermique qui se transmet de proche en proche, une molécule ou un atome cédant une partie de son énergie cinétique à son voisin (la vibration de l'atome se ralentit au profit de la vibration du voisin).Elle représente le mode de transfert qui s'effectue entre les différentes couches du verre, de la couche supérieure qui en contacte directe avec la flamme et les rayons qu'elle transmet vers les couches inferieures.

IV. Les courants convectifs du four :

Le chauffage du verre est obtenu par des flammes qui se développent au-dessus de la surface du verre en fusion. Une partie de l'énergie thermique dégagée par la combustion est transmise directement au verre par rayonnement et convection, une autre partie est transmise à la voûte qui la restitue au verre par rayonnement.

La qualité de l'affinage, qui conditionne celle du verre sortant du four, est basée sur l'existence de courants thermiques dans la masse vitreuse (figure V.6).

Ces courants de convection :

- **o**pèrent un brassage du verre ;
- **a**ugmentent le temps de séjour du verre dans le four ;
- **é**vitent que du verre incomplètement fondu ou mal affiné s'écoule directement vers la gorge.

Ces courants (figure V.6) sont essentiellement induits par un point chaud qui doit se trouver approximativement aux deux tiers de la longueur de la zone de fusion. On contrôle la position du point chaud en agissant sur la répartition de la puissance thermique. Ce point chaud crée un mouvement de « courroie » dans le verre. Donc, le verre le plus froid dans la zone d'enfournement est le plus dense, à tendance à s'écouler vers le fond de la cuve, et le verre chaud est moins dense à tendance à remonter au point chaud.

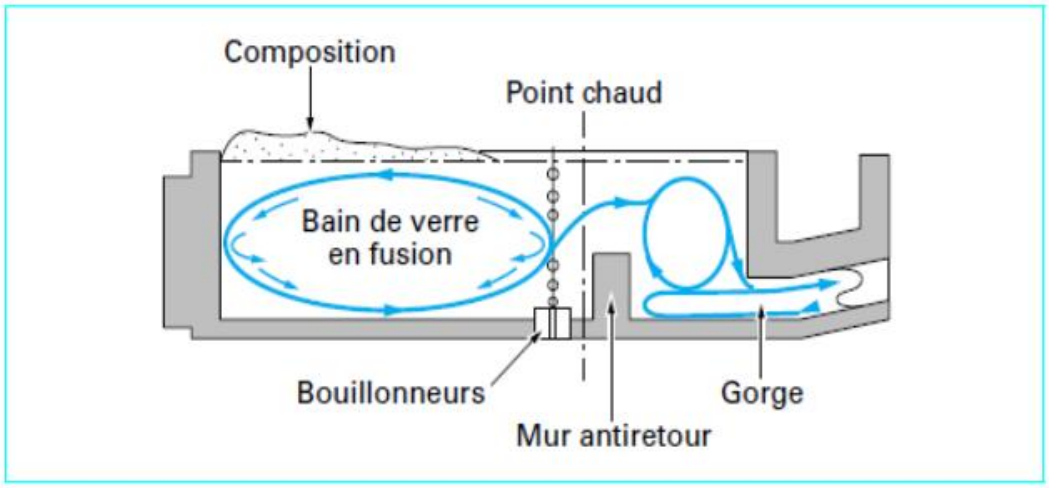


Figure V.6: Courants convectifs de verre dans la cuve.

Nous avons deux types de courants internes au niveau du four : longitudinaux et transversaux(Les figures V.7, V.8 et V.9) Ils contribuent à eux deux à l'homogénéisation naturelle du verre.

1. Courants transversaux :

C'est le résultat du transfert thermique du milieu vers la paroi. Ces courants sont très courts du fait de la largeur de la zone de fusion (12m) et donc plus faibles. Ces courants sont responsables de l'ascension des bulles d'air emprisonnées dans le verre à la surface.

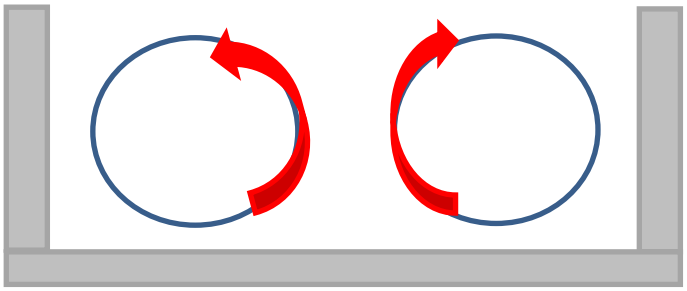


Figure V.7 : Orientation des courants transversaux.

2. Courants longitudinaux :

Ils proviennent du point le plus chaud du milieu de la largeur du ruban vers les extrémités du ruban qui sont moins froid.

C'est le résultat de la différence de température du point chaud et la zone d'enfournement (courant de retour) et le point chaud et la sortie du four sur une distance de près de 64m. Les deux courants sont très longs et très puissants. Ils ont la mission d'acheminer le verre fondu à la sortie du four. Un barrage d'eau immergé dans le verre fondu est installé au niveau de la gorge afin de :

stabiliser les courants longitudinaux et améliorer la qualité du verre en bloquant les infondus au niveau de la zone de fusion.

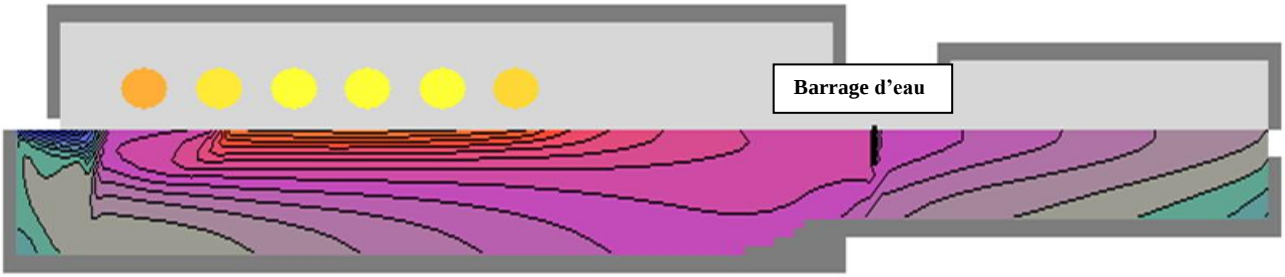


Figure V.8 : Courants longitudinaux (coupe de profil).

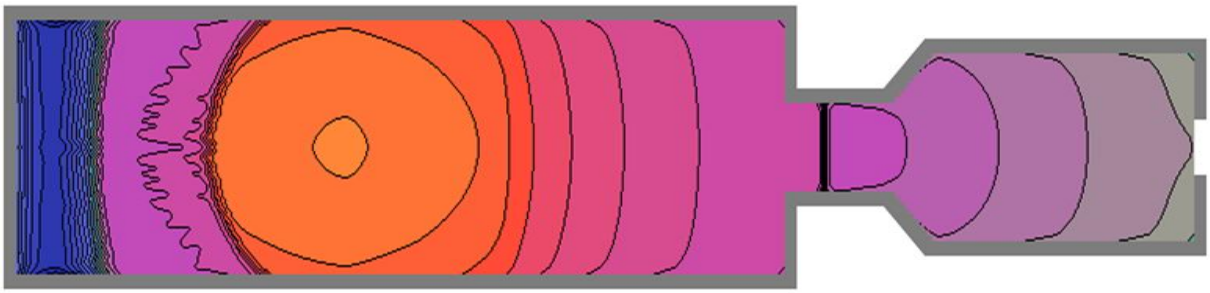


Figure V.9 : Courants longitudinaux (coupe de haut).

V. Matériaux réfractaires pour la conception du four :

Le choix des réfractaires est un des éléments les plus importants dans la conception des fours de fusion du verre. C'est à la fois un choix technique et un choix économique. Il dépend de la nature du verre, des températures atteintes dans les différentes zones du four, de l'énergie utilisée, du procédé de mise en forme et de la durée de vie du matériau et son recyclage. Généralement, deux types de réfractaires sont utilisés pour les fours verriers et de mise en forme différentes : les réfractaires agglomérés (par frittage) et les réfractaires électrofondus (coulage en fonderie).

La famille des réfractaires agglomérés contient la magnésie, la chrome magnésie, la zircone magnésie, le spinelle et la chromite. Par contre, les réfractaires électrofondus se distinguent par quatre grandes familles : les Alumines-Zircone-Silice(AZS), les Alumines-Zircone-Silice-Chrome(AZSC), les Très Haute Teneur en Zircone(THTZ) et les Haute teneur en Alumine(HA).

Chaque zone d'un four verrier est constituée de briques réfractaires différentes, ces dernières vont être le siège d'agressions de natures différentes, et naturellement combinées entre elles : **thermiques**, **chimiques**, et **mécaniques.**

Toutes ces sollicitations sont regroupées dans le tableau N°V.1 en dessous, Elles interviennent simultanément; donc, pour maximiser et optimiser la durée de vie du four, on perçoit l'importance du choix des réfractaires pour assurer une usure la plus lente et homogène possible des différentes parties du four.

Nature de la sollicitation	Agent agressif	Zones affectées	Propriétés attendues du matériau
Thermique	Température Gradient thermique	Toutes	-Réfractarité,stabilité thermique -Faible conductivité thermique -Résistance à la fatigue thermique
Chimique	Verre Corrosion chimique à l'interface **verre/réfractaire**	Parties immergées	-Stabilité chimique. -Faible réactivité. -Bonne compatibilité des produits de corrosion avec le verre.
	Corrosion dite « coup de sabre » à l'interface **verre/air/ réfractaire**	Fusion Affinage Conditionnement	
	Corrosion par volage à l'interface **réfractaire/gaz**	Superstructure Régénérateurs	Résistant aux vapeurs (Na_2SO_4, NaOH,…)
Mécanique	Abrasion par les matières premières	Enfournement	-Résistance mécanique et dureté élevées. -Résistance au fluage.
	Déformation par fluage	Voûtes	

Tableau °N V.1:Les différentes sollicitations que subissent les réfractaires dans un four verrier.

Dans les fours « float », des blocs en AZS électrofondus (figure V.10) très performants se trouvent dans la partie fusion, et pour des problèmes de qualité, on utilise généralement des réfractaires électrofondus alumineux (figure V.11) dans la zone d'affinage, au-delà de la zone de brûleurs,la constitution des briques réfractaires du four MFG sont données dans les annexes n°5 et n°6.Le tableau N° V.2 suivant résume tous les réfractaires des zones différentes du four MFG

Zone	Type de réfractaires
Paroi de la zone de fusion et d'affinage	réfractaires électrofondus type AZS 41#, 36# et 33#
Paroi de la zone de repos	réfractaires électrofondus à haute teneur en alumine (corindon)
Superstructure	Réfractaires agglomérés de silice
Gorge	réfractaires électrofondus type AZS 33#
Angles morts	réfractaires électrofondus type AZS 41#
Murs de frappe	réfractaires électrofondus type AZS 41#
Pignon en L	Réfractaires agglomérés de silice
Empilage	réfractaires de magnésie
Sole du four	réfractaires électrofondus type AZS 33#

Tableau N°V.2 : Les différents types des réfractaires utilisées par MFG [22].

Figure V.10:Réfractaires électrofondus type AZS

Figure V.11 : Réfractaires électrofondus d'alumine

La deuxième partie :

ETUDE EXPERIMENTALE

I. Aperçu sur l'objectif du travail:

Après neuf (09) années d'exploitation, le four de fusion de MFG arrive à terme (la vie du four initialement programmée à dix (10) ans). Ceci dit, la consommation énergétique est au seuil maximal à cause du vieillissement de ce dernier. Cette augmentation de consommation d'énergie affecte les briques réfractaires et détériore d'avantage le four de fusion. A noter que la vie d'une usine de verre est calculée sur la vie de son four de fusion.

Afin de bien savoir la situation réelle du four, l'étude de la consommation spécifique (débit de gaz) est nécessaire compte tenu du vieillissement du four et des changements des matières premières opérés au cours des années d'exploitation principalement le sable, la dolomie et le calcaire, qui sont actuellement de consommations locales.

Donc mon travail pratique consiste à faire :

- Une étude du débit spécifique (consommation spécifique C_S) pour 1 Kg de verre fondu pour les années 2011, 2015 et 2016. Ces années sont choisies à cause de la non-disponibilité de l'historique des données (archivage de 05 ans selon les procédures en vigueur de MFG). Ceci va permettre d'étudier l'influence du débit spécifique sur la durée de vie du four de fusion.

- Influence des paramètres du régime thermique (débit spécifique) sur la qualité du produit qui sont :

  - Une étude sur l'influence des courants convectifs sur la qualité du produit fini.
  - L'influence de la dégradation du four sur le produit fini.
  - Une analyse granulométrique pour des échantillons des matières premières (sable, calcaire, dolomie) et leur influence sur la combustion du gaz et la qualité du produit fini.
  - Une analyse d'humidité des matières premières (sable, calcaire, dolomie).

Au terme de l'analyse, une conclusion générale est donnée où je vais essayer de donner des recommandations ou solutions techniques et économiques, afin d'optimiser la consommation énergétique en gaz et minimiser les pertes de chaleur au niveau du four de fusion. Ces solutions auront à augmenter la durée de vie du four pour 3 ans encore (plus de la durée initialement prévue), tout en minimisant les défauts du produit fini provenant du four de fusion (amélioration de la qualité et augmentation du rendement de production).

II. Calcul du débit spécifique (la consommation spécifique C_S) :

Le débit thermique spécifique (symbole *Cs*), ou consommation spécifique, est déterminée par la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un degré la température de l'unité de masse d'une substance **[22].**

Pour calculer le débit spécifique pour 1 Kg de verre fondu, nous allons utiliser deux méthodes différentes et qui se feront par :

A- Composition chimique du verre.
B- Débit du gaz.

A- La première méthode : composition chimique du verre :

Le laboratoire central de MFG veille à l'assurance d'une meilleure qualité des produits, il s'occupe également des tests de contrôle et d'analyses sur les matières premières et le produit fini, ce qui permet d'intervenir pour réparer les problèmes qui sont à l'origine de certains défauts.

a. Méthode d'analyse chimique utilisée : fluorescence X

La technique de la Fluorescence X est une technique d'analyse chimique qualitative et quantitative utilisant une propriété physique de la matière ; après avoir été bombardé par des rayons X, l'échantillon réémet de l'énergie sous la forme, entre autres, de rayons X **[23]**. Etant donné que la technique de fluorescence X est une technique qui donne une information sur quelques micromètres, pour déterminer la composition chimique des défauts qui sont positionné loin de la surface, il est important de procéder à un polissage afin d'atteindre le défaut.

Cette méthode permet de donner la composition chimique des matières premières pour la production du verre. Avant d'analyser une matière, on fait passer des échantillons standards pour élaborer un programme (ces échantillons ont une composition connue).

Pour faire le test de fluorescence, il faut premièrement préparer l'échantillon à analyser :

b. Mode opératoire de la préparation de la pastille de l'échantillon :

- On prend 10 g de fondants spéciaux utilisés pour abaisser la température de fusion avec 1 g d'une matière première (sable, calcaire, dolomie….), on met le mélange dans un petit four appelé *MiniFuse* (figure 1) chauffé à 1000°C pendant 5 mn.

- Après refroidissement on enlève la perle (figure 2).

- On Poli l'échantillon pour lui donner une forme ronde (4 cm de diamètre) à l'aide une polisseuse (figure 3).

- On l'introduit dans la machine de fluorescence et on effectue l'analyse.

- À partir d'un logiciel, on détermine la composition chimique de l'échantillon à analyser (figure 4).

Figure 1: Photo d'un Mini Fuse.

Figure 2: La mise en forme de perle.

Figure 3:Polisseuse pour la préparation des échantillons.

Figure 4 : Appareil de l'analyse chimique par fluorescence.

c. Les exigences techniques MFG des matières premières :

La fiche technique des teneurs en (%) des éléments chimiques exigées pour les matières premières (sable, feldspath, dolomie, calcaire) du fabricant MFG est présentée dans le tableau N°1 ci-après :

Eléments / Matière première	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	$CaCO_3$	Cr_2O_3	TiO_2	K_2O	Na_2O	CaO	MgO	PF
sable	≥99,2 ±0,30	≤0,30 ±0,10	≤0,05 ±0,02	-	≤05 ppm	≤0,03	≤0,1 ±0,05	-	-	-	≤ 0,2
feldspath	≤70 ±0,5	≥16 ±0,50	≤0,20 ±0,05	-	-	-	≥6 ±0,6	≥6 ±0,6	≤0,8 ±0,15	≤0,5 ±0,15	≤ 0,5
dolomie $CaMg(CO_3)_2$	≤1,00 ±0,30	≤0,8 ±0,15	≤0,05 ±0,01	-	-	traces	traces	traces	≥30,0 ±0,5	>21,00 ±0,5	47/ 47,5
carbonate de calcium (calcaire) CaCO3	≤0,25 ±0,02	≤0,10 ±0,05	≤0,05 ±0,01	≥98,5	≤4-5 ppm	-	-	-	≥55,20 ±0,30	≤1,00 ±0,30	-

Tableau N°1 : Les exigences des matières premières du fabricant MFG.

La fiche technique des teneurs en (%) des éléments chimiques exigées pour les matières premières (carbonate de soude, sulfate de soude) du fabricant MFG est indiquée dans le tableau N°2 ci-après :

Eléments / Matière première	Na_2CO3	NaCl	Fe_2O_3	Na_2SO4	Na_2O
carbonate de soude (Na_2CO_3)	≥99,20 ±0,40	≤0,30 ±0,15	≤0,004	≤0,10	-
sulfate de soude (Na_2SO4)	-	≤0,30 ±0,05	≤0,01 ±0,005	≥99,00 ±0,40	43

Tableau N°2 : Les exigences des matières premières du fabricant MFG.

Les tableaux N°3et N°4 représentent les exigences en (%) du fabricant MFG pour le charbon et l'oxyde de fer.

Charbon :

Eléments	C	Cendre	volatils	Na_2SO_4
Teneur en (%)	≥80,00 ±0,30	≤15 ±1,0	≤10 ±1,0	≤0,10

Tableau N°3 : Les exigences du charbon en (%) du fabricant MFG.

Oxyde de fer :

Eléments	Fe_2O_3	Al_2O_3	Cu	Ni	V	Co	Cr	Mn	PF
Teneur en (%)	≥95 ±3,00	≤1,0 ±0,035	≤0,05 ±0,01	≤600 ppm	≤600 ppm	≤600 ppm	≤600 ppm	≤600ppm	≤1

Tableau N°4 : Les exigences d'oxyde de fer en (%) du fabricant MFG.

Au cours de mon stage, nous avons fait une analyse de la composition chimique, tous les résultats exigées par la premières méthode sont présentées sur le tableau N°5, ces dernières sont une base des nos calculs, qui vont suivre par la méthode en cour :

	Le barème%	**Composition chimique(%)**						
Nom de la matière	(Calcul par la matière mélangée)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	R_2O	C
Sable	56.52	99.45	0.20	0.059	0.05	0.05	0.031	-
Feldspath	4.22	70.09	16.44	0.123	0.44	0.02	12.52	-
Dolomie	16.88	0.69	0.22	0.031	30.65	20.95	0.00	-
Calcaire (carbonate de calcium)	3.40	0.27	0.08	0.012	55.88	0.17	0.00	-
Carbonate de soude	18.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-
Sulfate de soude	0.753	0.00	0.00	0.00	0.06 (CaO+ MgO)	-	0.00	-
Charbon	0.037	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	88.34
Oxyde de fer	0.013	0.354	0.453	98.26	0.174	0.227	0.13	
Total	100							

Tableau N°5 : Le barème et la composition chimique des matières premières.

Le tableau N°6 indique les pourcentages des différents éléments chimiques pour la composition du verre voulue qui va être prise pour nos calculs du débit spécifique du gaz :

Les éléments	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**CaO**	**MgO**	**R_2O (K_2O+Na_2O)**	**Fe_2O_3**	**autre**	**total**
Teneur %	71,67	0,98	8,76	4.33	13,91	0,070～0,075	0,25	100,00

Tableau N°6 : La composition de verre.

d. Calcul de la consommation d'énergie par unité de verre liquide pour le four de fusion:

Notre calcul se fera selon la composition chimique des matières premières présentent dans la ligne de verre float de MFG, qui est de 600 tonne/jours, ainsi que 30% de calcin qui est pris aussi comme la base de calcul.

Remarque :

Les formules qui sont utilisées dans ce mémoire et qui vont suivre pour notre calcul sont des formules propres à l'usine MFG (documentation interne d'usine donnée par le constructeur du four CLFG : China Luoyang Float Glass). Nous avons choisi aussi de montrer une seule application numérique pour chaque relation, vue le nombre important des calculs et afin d'avoir une meilleure vision [24].

1. Calcul de la quantité d'oxyde formé dans 100kg de la matière mélangée :

Elle est donnée par la formule suivante :

Quantité d'oxyde/kg = pourcentage de chaque matière première *0.96*pourcentage de chaque élément chimique ……(1)

Remarque :

Le taux d'eau dans la matière mélangée(le calcin exclu) est égal à 4%, donc le mélange sec est de 96%(0,96).

On prend comme exemple de calcul pour le sable :

Quantité d'oxyde/kg = Pourcentage du sable dans le mélange *0.96*pourcentage d'oxyde de silicium(SiO_2).

Application numérique : Quantité d'oxyde/kg = 56,52*0.96*0,9945=53.96077 %.

Le tableau N°7ci-après résume tous nos calculs pour la quantité d'oxyde/Kg pour chaque matière première et pour différents composant :

Nom	Calculer la quantité d'oxyde formant le verre liquide			la quantité d'oxyde/kg(%)						
				SiO_2	$A1_2O_3$	Fe_2O_3	CaO	MgO	R_2O	total
Sable	56,52	0,96	0,9945	53,96077						
	56,52	0,96	0,002		0,10852					
	56,52	0,96	0,00059			0,03201				
	56,52	0,96	0,0005				0,02713			
	56,52	0.96	0,0005					0,02713		
	56,52	0.96	0,00031						0,01682	54,17238
Feldspath	4,22	0,96	0,7009	2,95779						
	4,22	0,96	0,1644		0,6660173					
	4,22	0,96	0,00123			0,004983				
	4,22	0,96	0,0044				0,01782			
	4,22	0,96	0,0002					0,00081		
	4,22	0,96	0,1252						0,50721	4,15462
Dolomie	16.88	0,96	0,0069	0,11181						
	16,88	0,96	0,0022		0,03565					
	16,88	0,96	0,00031			0,00502				
	16,88	0,96	0,3065				4,96677			
	16,88	0,96	0,2095					3,39491		
	16,88	0,96	0						0	8,51416
Calcaire	3,4	0,96	0,0027	0,00881						
	3,4	0,96	0,0008		0,00261					
	3,4	0,96	0,00012			0,00039				
	3,4	0,96	0,5588				1,82392			
	3,4	0,96	0,0017					0,00554		
	3,4	0,96	0						0	1,84127
Carbonate de soude	18,18	0,96	0						0	0
Sulfate de soude	0,753	0,96	0	0						
	0,753	0,96	0		0					
	0,753	0,96	0			0				
	0,753	0,96	0				0			
	0,753	0,96	0					0		
	0,753	0,96	0						0	0
Charbon	0,037	0,96	0	0						
	0,037	0,96	0		0					
	0,037	0,96	0			0				
	0,037	0,96	0				0			
	0,037	0,96	0					0		
	0,037	0,96	0						0	0
Oxyde de fer	0,013	0,96	0,00354	0,000044						
	0,013	0,96	0,00453		0,000056					
	0,013	0,96	0,9826			0,001226				
	0,013	0,96	0,00174				0,000021			
	0,013	0,96	0,00227					0,000028		
	0,013	0,96	0,0013						0,000016	
										0,001391
Total				57,039224	0,8128533	0,043629	6,835661	3,428418	0,524046	68,683821
Composition de verre (%)				71,67	0.98	0,075	8,76	4,33	13,91	99.725

Tableau N°7 : Calcul des quantités d'oxydes/Kg à partir de la composition chimique des matières.

2. Constante de vitesse de la fusion :

Pour déterminer la température de fusion du verre on utilisant la formule de Wolf (2) qui suit:

$$\tau = \frac{SiO2\ \% + Al\ 2\ O3\%}{R2O\ \%} \quad (2)$$

Le tableau N°8 donne la relation entre la constante de vitesse de la fusion τ et la température de fusion t_{fusion} pour avoir la température qu'on va utiliser dans nos calculs du débit spécifique.

τ	6	5.5	5.25	4.8	4.2
Température de fusion t_{fusion} (°C)	1450～1460	1420	1410	1380～1400	1320～1340

Tableau N°8 : La relation entre la constante de vitesse de la fusion τ et la température de fusion t_{fusion}

Application numérique :

$$\tau = \frac{71,67+0.98}{13,91} = 5,22$$

Donc, d'après le calcul de la constante de vitesse de la fusion on comparant avec le tableau ci-dessus, la température de fusion est : 1410°C

3. Energie consommée pour la formation de silicate :

Elle est calculée pour 1kg de la matière mélangée, son unité est kJ／kg :

- L'énergie consommée q_1 pendant la réaction de la formation de $CaCO_3$ à $CaSiO_3$ est donnée par la relation suivante :

q_1=1536,6 *G_{CaO} en KJ……………………………………………………...……………(3)

G_{CaO} = ∑ de la quantité d'oxyde/kg du **CaO** pour (sable, calcaire et l'oxyde de fer).

Application numérique : q_1 = 1536,6*(0,0002713+0,0182392+0,00000021) =28,4435 KJ.

- L'énergie consommée q_2 pendant la réaction de la formation de $MgCO_3$ à $MgSiO_3$ est donnée par la relation suivante :

q_2= 3466,7*G_{MgO} en KJ……………………………………..………………………….………. (4)

G_{MgO} =∑ de la quantité d'oxyde/kg du **MgO** pour (sable, calcaire et sulfate de soude).

Application numérique : q_2=3466,7*(0,0002713+0,0000554+0)=1,1326 KJ.

- L'énergie consommée q_3 pendant la réaction de la formation de $CaMg(CO_3)_2$ à $CaMg(SiO_3)_2$ est donnée par la relation suivante :

q_3=2757.48*G_{CaMgO} en KJ…….....(5)

G_{CaMgO} =∑ de la quantité d'oxyde/kg du **CaO et MgO** pour la dolomie.

Application numérique: q_3=2757.4*(0,0496677+0,0339491)=230,5649KJ.

- L'énergie consommée q_4 pendant la réaction de la formation de $NaCO_3$ à $NaSiO_3$ est donnée par la relation suivante :

q_4=951,7*G_{Na2O} en KJ……..(6)

G_{Na2O} =∑ de la quantité d'oxyde/kg du **R_2O (**K_2O+Na_2O) pour la carbonate de soude.

Application numérique : q_4=951.7*0=0KJ.

- L'énergie consommée q_5 pendant la réaction de la formation de $NaSO_4$ à $Na2SiO_3$ est donnée par la relation suivante :

q_5=3467,1*G_{Na2O} en KJ…….....(7)

G_{Na2O} =∑ de la quantité d'oxyde/kg du **R_2O (**K_2O+Na_2O) pour la sulfate de soude.

Application numérique : q_5=3467.1*0=0KJ.

- L'énergie consommée pour la formation de silicate par 1kg de la matière mélangée est donnée par la relation suivante :

  q_1'=q_1+q_2+q_3+q_4+q_5……..(8)

Application numérique : q_1'=28,4435+1,1326+230,5649+0+0=260,141 KJ

4. Composition du gaz libéré par 100kg de la matière mélangée:

Les calcules de ces quantités par composition sont appliqués suivant la relation qui suit et tous les résultats sont résumés dans le tableau N°9.

Quantité du gaz libéré = Pourcentage de matière dans le mélange*0.96*PF……(9)

PF : représente la perte au feu qui est donnée par la relation suivante :

PF=100-somme des pourcentages de la composition chimiques……..(10)

Nom	Le calcul de la quantité de gaz libéré				la quantité de gaz libéré(%)			
	Teneur %	Matière sèche	PF		CO_2	H_2O	SO_2	Total
Dolomie	16,88	0,96	0,4746		7,6908			7,6292
Calcaire	3,4	0,96	0,4359		1,4228			1,4228
Carbonate de soude	18,18	0,96	0,09		1,5707			1,5707
Sulfate de soude	0,753	0,96	0,9994				0,7224	0,7224
Charbon	0,037	0,96	0,8834	Pour le CO_2 (12+16*2)/12				0,115
Le mélange vitrifiable	100	0,04	4			4		4
La masse kg					10,6843	4	0,7224	15,3451
Le volume (état standard) ／m^3					8,3908	4,978	0,1435	13,5121
Le pourcentage(%)					62.10	36.84	1.06	100.00

Tableau N°9 : Quantités de gaz libérés à partir des différentes matières premières.

5. **Calcul de la quantité d'utilisation de la matière mélangée avec calcin (%30):**

La quantité du gaz totale libéré est de 15,3451 % par un 1kg de la matière mélangée.

La quantité d'utilisation de la matière mélangée=100% - la quantité du gaz libéré G_{gaz} %+ le taux de calcin(%).

Application numérique : 100 – 15,3451+30= 54,65 (%de verre liquide) donc 0,5465 Kg de verre liquide.

Donc, pour avoir 1kg de verre liquide la quantité exigée de la matière mélangée est :

$$\mathbf{G_P} = \frac{1}{\text{la quantité d'utilisation de la matière mélangée}} \quad \ldots\ldots (11)$$

Où :

G_P : la quantité de matière en poudre.

Application numérique : $G_P = \frac{1}{0,5465} = 1,8298$ (Kg).

Le calcin exigé est :

$$\mathbf{G_c} = \frac{0,3}{\text{La quantité d'}\mathit{utilisation}\text{ de la matière mélangée}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (12)$$

Où :

G_c : la quantité de matières avec calcin.

Application numérique : $\mathbf{G_c} = \frac{0,3}{0,5465}$ **=0,5489 (Kg).**

Pour avoir 1kg de verre liquide la quantité de la matière mélangée avec calcin est donnée par la formule suivante :

Gm＝Gp+Gc ……………………………………………………………………………….………(13)

Application numérique : **Gm＝2,3787 (kg).**

L'équilibre de quantité d'énergie pendant le formage de verre : calculé à partir par 1kg de verre liquide, l'unité est kJ／kg.

6. Calcul d'Energie consommée :

a. l'énergie consommée pour la formation de silicate q_I : est donnée par la relation suivante :

$\mathbf{q_I = q_1' * G_p}$………………………………………………………………………….....(14)

Application numérique : q_I=260,141*1,8298=476,0060 KJ/Kg.

b. Energie consommée pour la formation de verre liquide q_{II} : est donnée par la relation suivante :

$\mathbf{q_{II} = 347\ .G_p\ (1 - 0.01\ G_{gaz})}$ ………..…………………………………………………….. (15)

Application numérique : q_{II}＝ 347*1,8298(1-0,01*15,3451)=537,5083 KJ/Kg.

c. Energie consommée pour réchauffer le verre liquide jusqu'à une température de 1410°C

$\mathbf{q_{III}}$ est donnée par **la formule de Sharp-Genther** (16) **ou l'énergie de consommation** égale à:

$$\mathbf{C_{verre}} = \frac{at+c}{0.00146t+1} * 4,1868 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (16)$$

Où :

a et c : des constantes (a＝0.00051 ; c＝0.17591).

t : température de fusion du verre.

Et suivant le calcul de composition de verre : a＝0.00051 ; c＝0.17591, et avec l'application numérique, on trouve : C_{verre}＝ 1,225144 （**kJ/kg**）

Donc, appliquant la formule suivante :

$$q_{III} = C_{verre} . t_{verre} \quad \text{.....(17)}$$

Application numérique : q_{III} ＝1,2252*1410=1727,391 KJ/Kg.

d. l'énergie consommée de la libération de gaz réchauffant à la température de 1410°C q_{IV} :

Lorsque la température est de 1410°C, l'énergie moyenne de la libération de gaz est donnée par la relation suivante:

$$C_{\text{libération de gaz}} = 0.01*[C_{co2}*(\%CO_2+\%SO_2) + \%C_{H2O}*H_20] \quad \text{.....(18)}$$

Application numérique : $C_{\text{libération de gaz}}$＝ 0.01* (2.325*63.16+1.824 * 36.84)

=2.1404 (kJ/m^3).

$$q_{IV}=0.01 *v_{\text{libération de gaz}} *G_{poudre} *c_{\text{libération de gaz}} *t_{fusion} \quad \text{.....(19)}$$

Application numérique : q_{IV}=0.01 *13,5121*1.8298*2.1404*1410

=746,1747 KJ/Kg.

e. l'énergie consommée pour l'évaporation de l'eau q_v : est donnée par la relation suivante :

$$q_v = 2491*G_{poudre} * G_{eau} \quad \text{.....(20)}$$

Application numérique : q_v =2491*1.8298*0.04

=182,3213 KJ/Kg.

f. L'énergie absorbée q_{VI} :

Supposant que la température est 20°C lors d'enfournement de la matière première dans le four.

La formule d'énergie de consommation : $C_{verre} = \frac{at+c}{0.00146t+1} * 4,1868$

Et suivant le calcul de composition de verre a＝0.00051 ; c＝0.17591, ça donne :

Application numérique : C_{verre}＝0,7570 （kJ/kg**).**

L'énergie amenée par la matière mélangée et le calcin est donnée par la relation suivante :

$$q_{VI} = G_{poudre}\, c_{poudre}\, t_{poudre} + G_{calcin}\, c_{calcin}\, t_{calcin} \quad \text{.....(21)}$$

Application numérique : q_{VI}=1,8298*0.963*20+0,5489 *0.757*20

= 43,5523 KJ/Kg.

g. L'énergie consommée pour la fusion de 1kg de verre pendant le processus de formation de verre :

Par la somme des énergies calculées auparavant : $q = q_I + q_{II} + q_{III} + q_{IV} + q_V - q_{VI}$

q ＝476, 0060 +537,5083+1727,391+746,1747 +182,3213 -43,5523 （KJ/kg）

＝ 3 625,849 (KJ/kg).

= 865,99 (Kcal/Kg).

Donc, l'énergie totale consommée pour la fusion de 1 Kg de verre dans la formation du verre est égale: 865,99 (Kcal/Kg).

Le tableau N°10 en dessous représente la consommation en gaz prévu en 2007, donnée par le constructeur du four (CLFG : China Luoyang Float Glass) **[24]** pour la bonne exploitation de ce dernier. Ces données sont issues du calcul de dimensionnement du four et la méthode de construction (méthode de calcul non donnée). On note que pour chaque diminution de 10 tonnes, il faut réduire la consommation du gaz de 1000m^3/Jour. Chaque trois (03) années d'exploitation, il faut augmenter la consommation en gaz de 3% à 10%.

Tirée (tonne/jr)	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600
Consomm-ation en gaz m^3/j	107600	108600	109600	110600	111600	112600	113600	114600	115600	116600	117600
Débit spécifique Kcal/Kg	**1 812**	**1 793**	**1 775**	**1 757**	**1 740**	**1 724**	**1 708**	**1 693**	**1 678**	**1 664**	**1 651**

Tableau N°10 : Les exigences (la consigne) d'usine MFG pour l'année 2007.

Le tableau N°11 en dessous représente les calculs thermiques des pertes énergétiques fait par le groupe CLFG : China Luoyang Float Glass **[24]** pour le four de fusion de la ligne de verre float de : 900t/j, 800t/j, 700t/j, 600t/j, 500t/j et 400t/j :

	Capacité du four de fusion	400t/j	500t/j	600t/j	700t/j	800t/j	900t/j
Les pertes énergétiques	la perte d'énergie par la superficie	14,19%	13,85%	13,12%	12,52%	12,02%	11,27%
	La perte par l'échange d'énergie de la fumée	29,30%	29,25%	29,15%	29,00%	28,84%	28,67%
	La perte d'énergie par les ouvertures et les trous	5,98%	4,65%	3,76%	2,67%	1,64%	1,16%
	l'efficacité de l'échange d'énergie avec le refroidissement d'air et d'eau	7,15%	6,59%	5,80%	4,14%	3,03%	2,18%
	La perte d'énergie par le retour de verre liquide	2,45%	3,55%	4,45%	5,16%	5,82%	6,53%
	l'autre perte d'énergie	2,79%	2,90%	1,90%	1,21%	1,14%	1,10%
	L'énergie efficace du four de fusion	38,14%	39,21%	41,82%	45,30%	47,51%	49,09%

Tableau N°11 : Les calculs thermiques des pertes énergétiques.

Pour notre cas, le four de fusion est de capacité de 600T/J, le débit spécifique nécessaire est calculé par la relation suivante :

$$\textbf{Débit spécifique} = \frac{\textbf{l'énergie consommée pour la fusion}}{\textbf{l'énergie efficace du four de fusion}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (22)$$

Application numérique : Cs = 865,99 / 41,82% = 2 071 Kcal/Kg.

<u>Interprétation des résultats des calculs :</u>

Selon l'étude initiale faite en 2007, l'énergie consommée pour la fusion de 1kg de verre pendant le processus de formation de verre est de 686,6 Kcal/Kg, soit un débit spécifique de 1 651 Kcal/Kg selon le tableau 10 d'exigences de MFG, mais après les calculs faites selon la 1ère méthode, le débit spécifique nécessaire pour la fusion du verre est de 2 071 Kcal/Kg. Ceci est dû au changement des matières premières et leurs caractéristiques. Un aperçu sur le changement des provenances des matières premières au fil des années confirme nos dires :

-Sable : Belgique(2007)→local Sig(2010)→un mélange (sable Sig, Tébessa 2011)→Ain Oussara(2014)

-Carbonate de soude : Espagne→ Chine→ USA.

-Dolomie : Espagne → Hongerie →locale.

-Calcaire : Espagne → locale.

-Feldspath: Espagne (par deux fournisseurs : EUROARCE 70%, INCUSA 30%).

Suite aux multiples changements des origines des matières premières au niveau de MFG, il est nécessaire de confirme nos calculs et résultats en recalculé le débit spécifique par la deuxième méthode pour avoir une meilleure approche de la variation de la consommation énergétique.

B- La deuxième méthode : par le débit de gaz(CH_4) :

On appelle débit d'un fluide (liquide ou gaz) s'écoulant dans une canalisation, la quantité de ce fluide qui traverse une section droite de l'écoulement pendant l'unité de temps. La quantité peut s'exprimer soit par le volume, soit par la masse (ou le poids) **[22].**

Nous appliquons la formule suivante : $C_S = \frac{Ggaz * \mathrm{PCI}}{la\ tirée}$ …….…. (23)

Où :

C_S : le débit spécifique en (Kcal/Kg).

G_{gaz} : le débit de gaz en (m^3).

PCI: le pouvoir calorifique inferieur en (Kcal/m^3), c'est une constante égale à 8421 (Kcal/m^3).

La tirée : la quantité de la production du verre en (Kg).

Le résultat de nos calcules du débit spécifique pour 1kg de verre fondu de l'exploitation de l'année 2011 sont dans le tableau N°12 ci-dessous :

Mois	Tirage	Taux calcin	Débit gaz	Débit spécifique
	tonnes	%	m^3/j	Kcal/Kg
Janvier	520,00	20	126 000	2 040
Février	521,22	28	128 168	2 071
Mars	524,71	22	133 959	2 150
Avril	550,58	21	148 134	2 266
Mai	550,48	21	145 408	2 224
Juin	550,60	34	140 548	2 150
Juillet	549,58	23	144 770	2 218
Août	548,97	26	147 252	2 259
Septembre	547,28	30	147 670	2 272
Octobre	558,80	44	145 729	2 196
Novembre	540,77	45	143 766	2 239
Décembre	550,60	26	133 226	2 038
la moyenne	542,80	28,38	140 386	2 176,87

Tableau N°12 : Les calculs du débit spécifique de l'année (2011).

D'après les consignes du tableau N°10 au dessus, pour l'année 2011 (voir annexe n°7), l'augmentation de la consommation énergétique pour les tirées de 520T/J et 550T/J est représentée dans le tableau N°13 comme suit :

2011	520 T/j		550 T/j	
	limite inférieure	limite supérieure	limite inférieure	limite supérieure
Gaz m^3/j	112 888	120 560	115 978	123 860
Débit spécifique Kcal/Kg	1 828	1 952	1 776	1 896

Tableau N°13: La consommation énergétique pour les tirées de 520T/J et 550T/J pour l'année 2011.

Les résultats du tableau N°12 et N°13 nous ont permis de tracer les variations du débit spécifique par rapport aux limites inférieure et supérieure dans la figure 5 pour l'année 2011.

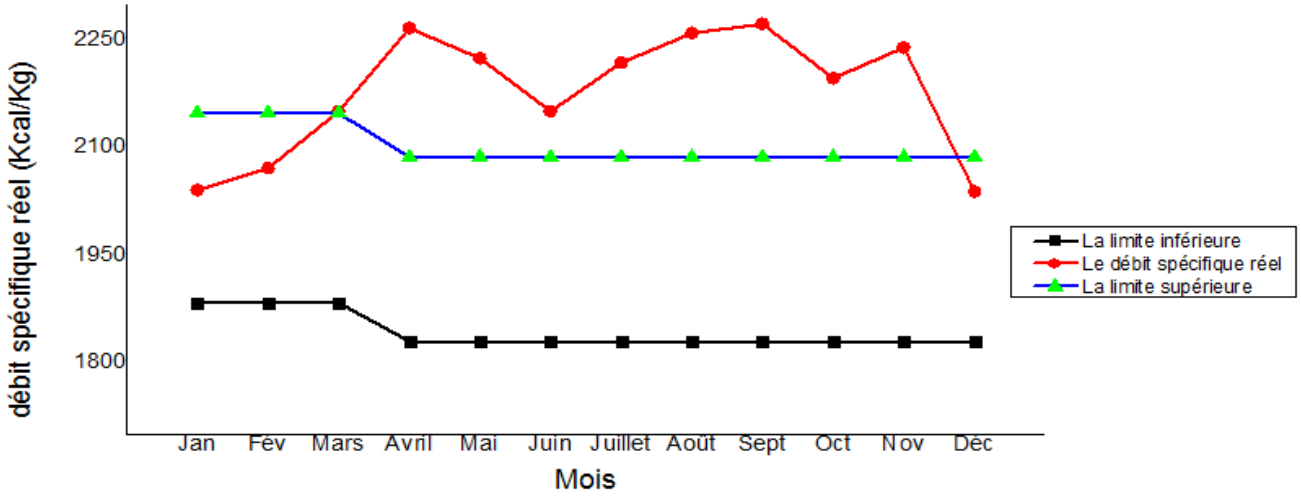


Figure 5 : Graphe représentatif du débit spécifique en fonction des mois de l'année 2011.

<u>Interprétations des résultats:</u>

Suivant le graphe, la consommation a été respectée pour le 1er trimestre mais une très grade hausse de consommation est enregistrée à partir du mois d'avril jusqu'au mois de novembre. Le mois de décembre a vu le retour aux exigences du process.

Cette augmentation est de l'ordre de 1 136KCal/Kg de verre (avr. 2011-nov. 2011) par rapport à la limite supérieure exigée, soit une consommation en gaz plus élevée de 74 120m^3/an.

Dans le marché industriel, un (01) m^3 de gaz coûte 20 DA. Donc la perte monétaire en consommation énergétique est de 1 482 400 DA pour l'année 2011.

Explication :

Ceci est dû au changement de l'origine du sable, initialement en 2007 MFG a commencé avec un sable importé de Belgique, puis en 2010, elle a lancé la station de traitement de sable avec le sable de Sig (Mascara). Ce dernier a été appauvri en termes de qualité chimique et granulométrique avec le temps, MFG a changé une autre source qui est le sable de Tébessa en décembre 2011. Cette augmentation de la consommation du gaz a influé surement sur le four de fusion du verre, en augmentant la dégradation des briques réfractaires (apparition de défauts des pierres réfractaires dans le produit fini) et en conséquence le risque de réduire la durée de vie du four. Aussi cette dégradation peut influer négativement sur le rendement de la production (baisse de rendement = baisse de revenu).

Nous avons fait les mêmes calculs pour l'année 2015, le résultat du débit spécifique pour 1kg de verre fondu sont donnés sur le tableau N°14 qui suit et la consommation énergétique pour l'année 2015 :

Mois	**Tirage**	**Taux de calcin**	**Débit de gaz**	**Débit spécifique**
	tonnes	**%**	**m^3/j**	**Kcal/Kg**
Janvier	513,6	30	146 961	2 410
Février	546,8	30	145 767	2245,3519
Mars	555	30	145426,76	2206,5563
Avril	555	25,68	152 868	2 319
Mai	555	27,2	155 686	2 362
Juin	555	28	160 018	2 428
Juillet	555	23,08	162 721	2 469
Août	555	24,84	159 936	2 427
Septembre	555	23,2	160 452	2 435
Octobre	553,6	27,68	159 209	2 422
Novembre	546,4	30	156 520	2 413
Décembre	548	30	156 974	2 413
la moyenne	549,45	27,4733333	155 212	2 379

Tableau N°14 :La consommation énergétique pour l'année 2015.

D'après les consignesn dessus dans le tableau N°10 vu auparavant, pour l'année 2015 (voir annexe N°7), l'augmentation de la consommation énergétique pour les tirées de 510T/J et 550T/J est représentée dans le tableau N°15 comme suit :

Année 2 015	**510 T/j**		**550 T/j**	
	limite inférieure	**limite supérieure**	**limite inférieure**	**limite supérieure**
Gaz m^3/j	115 214	131 406	119 457	136 246
Débit spécifique Kcal/Kg	1 902	2 170	1 829	2 086

Tableau N°15 : La consommation énergétique pour les tirées de 510T/J et 550T/J l'année 2015.

Nous avons tracé les variations du débit spécifique pour un kilogramme de verre fondu en fonction de tous les mois de l'année 2015 et qui sont représentées sur la figure 6.

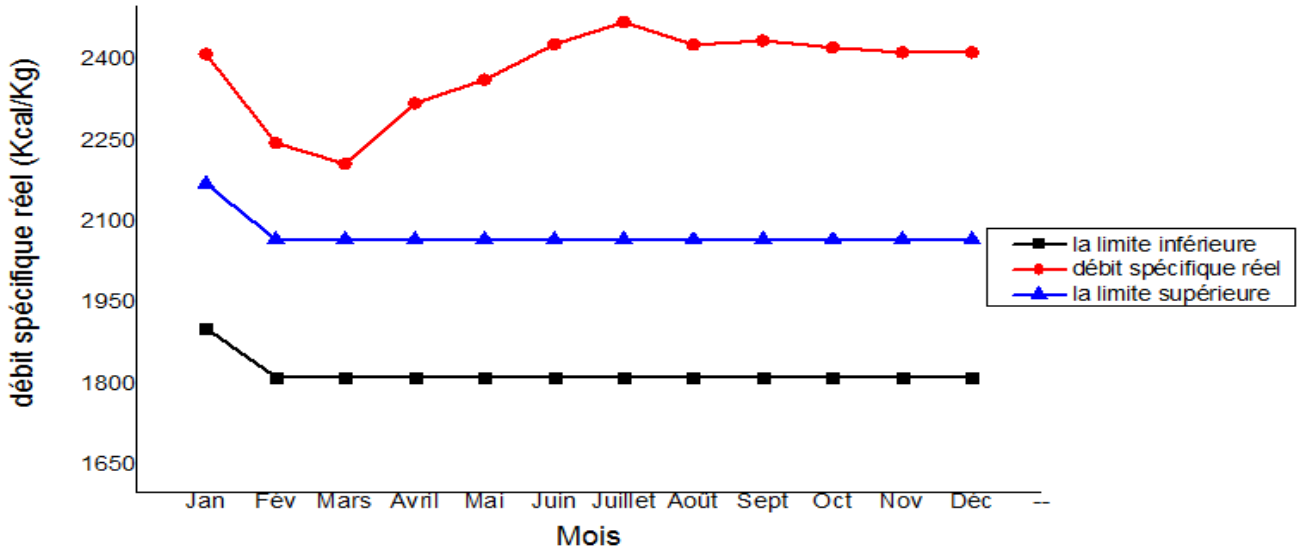


Figure 6 : Graphe représentatif du débit spécifique en fonction des mois de l'année 2015.

Interprétations des résultats:

Suivant le graphe, la consigne de la consommation énergétique n'a pas été respectée et l'augmentation a été enregistrée toute l'année 2015. Une augmentation du débit spécifique de 3643KCal/Kg, soit un volume en gaz de 237 712m^3 équivalent à une perte monétaire de 4 754 240DA.

La diminution relative aux mois de Février et Mars est due probablement à la réparation à chaud, réalisée par une équipe fumisterie professionnelle du 15/01 au 15/02/2015 ou plusieurs ouvertures et joints au niveau du four ont été colmatées.

Explication :

L'utilisation du sable Tébessa n'a pas été sans conséquence sur le fonctionnement du four. En effet, ce sable contient beaucoup de fines particules. Ces dernières ont bouché les ouvertures des mailles des briques d'empilage au niveau des chambres de régénération. En Conséquence, il y'a eu une augmentation de la pression du four, qui a pour effet l'emprisonnement des bulles d'air au niveau du produit fini. Donc, on a une perte du rendement. Enfin, la dégradation du four est accentuée et la longévité est réduite. Pour éliminer ce problème, MFG a changé encore la source du sable. Actuellement, c'est le sable d'Ain Oussara (Msila) qui est utilisé depuis Mars 2014. Ce dernier présente l'inconvénient d'avoir une granulométrie élevée par rapport aux exigences du process.

Le résultat de nos calcules du débit spécifique du premier trimestre de l'année 2016 pour 1kg de verre fondu sont donnés sur le tableau N°16 qui suit et la consommation énergétique :

	Tirage	Taux calcin	Débit gaz	Débit spécifique
Mois	**tonnes**	**%**	**m^3/j**	**Kcal/Kg**
Janvier	548	26,6	156 951	2 413
Février	533,4	27	148 169	2 344
Mars	518	30	148 009	2 407
la moyenne	533,13	27,87	151 043	2 388

Tableau N° 16: La consommation énergétique pour l'année 2016.

D'après les consignes du le tableau N°10 en dessus, et pour l'année 2016 (voir annexe N°7), l'augmentation de la consommation énergétique pour les tirées de 520T/J, 530T/J et 550T/J est représentée dans le tableau N°17 comme suit :

2 016	**520 T/j**		**530 T/j**		**550 T/j**	
	limite inférieure	**limite supérieure**	**limite inférieure**	**limite supérieure**	**limite inférieure**	**limite supérieure**
Gaz m^3/j	119 763	145 878	120 856	147 209	123 041	149 871
Débit spécifique KCal/Kg	1 939	2 362	1 920	2 339	1 884	2 295

Tableau N°17 : La consommation énergétique pour les tirées de 520T/J ,530T/J et 550T/J pour l'année 2016.

Nous avons tracé les variations du débit spécifique pour un kilogramme de verre fondu en fonction de tous les trois premiers mois de l'année 2016 et qui sont représentées sur la figure 7.

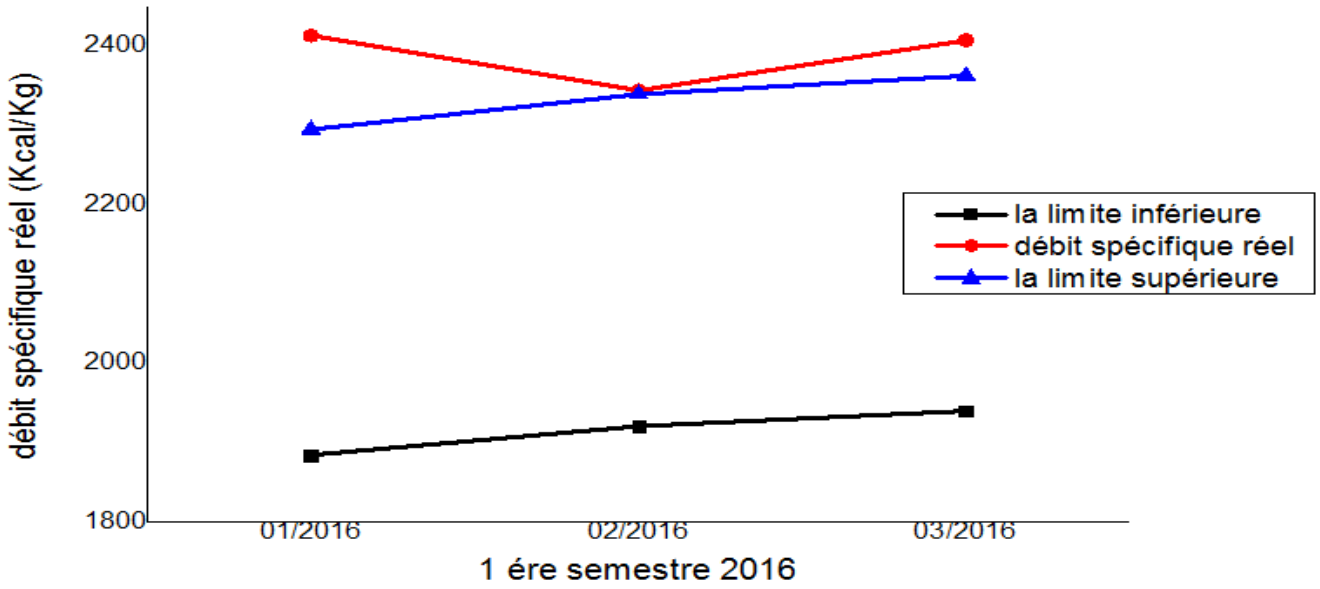


Figure 7: Graphe représentatif du débit spécifique en fonction du premier trimestre de 2016.

Interprétations des résultats:

La consommation énergétique est plus ou moins maitrisée pour le 1er trimestre 2016, avec une augmentation de débit spécifique de 168Kcal/Kg, soit un volume de gaz de 10 616m^3 équivalent à une perte monétaire de 212 320DA.

Conclusion :

Selon les résultats obtenus des années 2011, 2015 et 2016, la consommation énergétique a augmenté engendrant des pertes monétaires pour l'entreprise. Ceci est l'effet du changement répétitif de l'origine du sable et des fissures enregistrées au niveau du four où il y'a eu diverses pertes thermiques qui sont :

- pertes par les fumées Qf.
- pertes par les parois $Q_{v.}$
- pertes au réchauffage des parois Q_{mv}.
- pertes par les ouvertures du four Q_e .

Pour ce dernier paramètre, il y a une équipe de maçons fumistes dédiée pour la réfection de ces fissures. A noter que, plus la fissure est grande il y a augmentation de la consommation énergétique.

Comparant le calcul du débit spécifique par les deux méthodes nous avons trouvée que le débit spécifique calculé par la première méthode donc par la composition chimique est de 2 071 Kcal/Kg, ce résultat peut être appliqué pour les mêmes années d'étude à savoir 2011 et 2015 ,vue que nous avons déterminer la composition chimique de la matière première pendant mon stage donc en 2016,mais cette dernière reste d'actualité pour le calcul des autre années puisque la variation des pourcentages ne change que par la virgule. Ce débit reste toujours inférieure a celui calculé par la deuxième méthode (débit de gaz) vue il prend en compte dans les calculs les quantités des matières premières exigées sans prendre leurs caractéristique.

Concernant le changement de sable, une analyse détaillée sera donnée par la suite pour déterminer le facteur qui influe sur la consommation de gaz. A rappeler les facteurs qui influent sur la qualité du produit fini et l'énergie sont : la composition chimique, la granulométrie et l'humidité des matières.

III. Influence des paramètres du régime thermique sur la qualité du produit(le débit spécifique) :

III.1 Influence des courants convectifs sur la qualité du produit fini :

D'après nos calculs du débit spécifique par la méthode du débit de gaz, on a remarqué une augmentation relative entre les années : 2011 (2176,87 Kcal/Kg), 2015 (2379 Kcal/Kg), 2016 (2388 Kcal/Kg). Pour optimiser la consommation énergétique (débit spécifique) et par conséquent une qualité du produit fini meilleure, on doit contrôler les courants convectifs du verre liquide dans le bain de fusion qui, se fait par la stabilisation des températures de la voûte et du sol à l'aide des thermocouples insérés au niveau du four et aussi la position de la flamme dans la cuve.

Si le débit de gaz introduit dans le four dépasse les exigences, il provoque une perturbation dans l'écoulement du verre qui va arracher les infondus stagnées dans le sol de la cuve, donc une influence sur la qualité du verre d'une part et l'érosion des briques réfractaires d' autre part, et par conséquent la diminution de la durée de vie du four.

La stabilisation des courants convectifs :

- Pour stabiliser les courants internes et minimiser les défauts issus de four de fusion (les pierres, bulles), et par conséquent la consommation énergétique, on a prévu un barrage métallique (mur anti-retour) en réfractaires, encastré dans le sol et noyé dans le verre en fusion.

- Il en résulte que l'on a intérêt à avoir une cuve profonde pour autant que le verre du fond soit assez fluide, donc suffisamment chaud pour participer aux courants de convection, la profondeur de la cuve de fusion est donc fonction de la transparence du verre vis-à-vis de la radiation des flammes (donc de sa couleur), et de la température de flamme. La cuve du four MFG est de 1400mm de profondeur.

- La stabilisation des courants convectif dépendent aussi du régime thermique, il faut fixer la température de la cuve de fusion (le sol, la voûte) en respectant la courbe du feu du four de fusion (voir figure 8), et la stabilisation de la position de la flamme où elle doit être trois quart (3/4) du volume de la cuve.

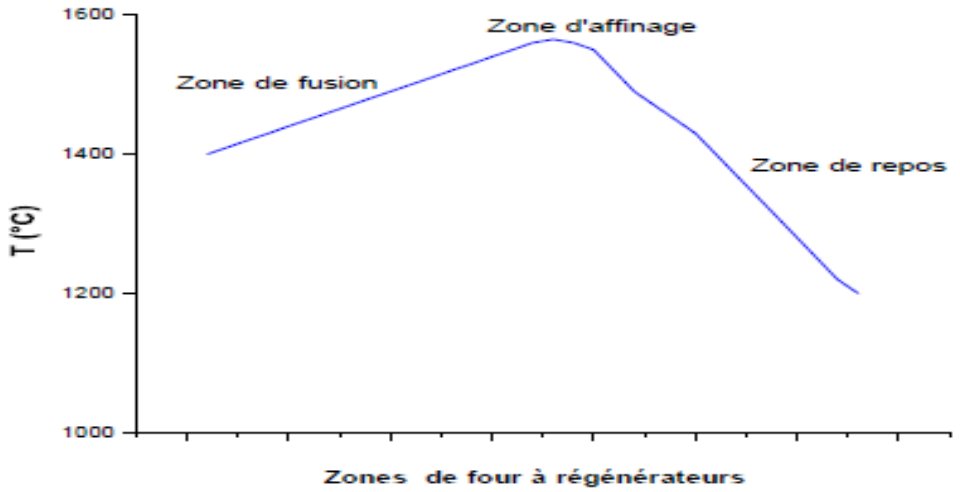


Figure 8 : Régime thermique du four à régénérateurs [24].

- On contrôle la position du point chaud (la chambre de combustion n°4) c-à-d la ligne de motte, en agissant sur le nombre et l'intensité de flammes ainsi que leur localisation au dessus du bain qui sont choisis tout d'abord pour créer un profil de chauffe particulier qui favorise notamment les courants de convection.

La figure 9 représente les températures de voûte en mois d'avril 2016 ces températures donnent une stabilisation des courant convectifs, pendant le mois d'avril, où a remarqué une meilleur qualité de produits fini, donc on doit fixer ces paramètres.

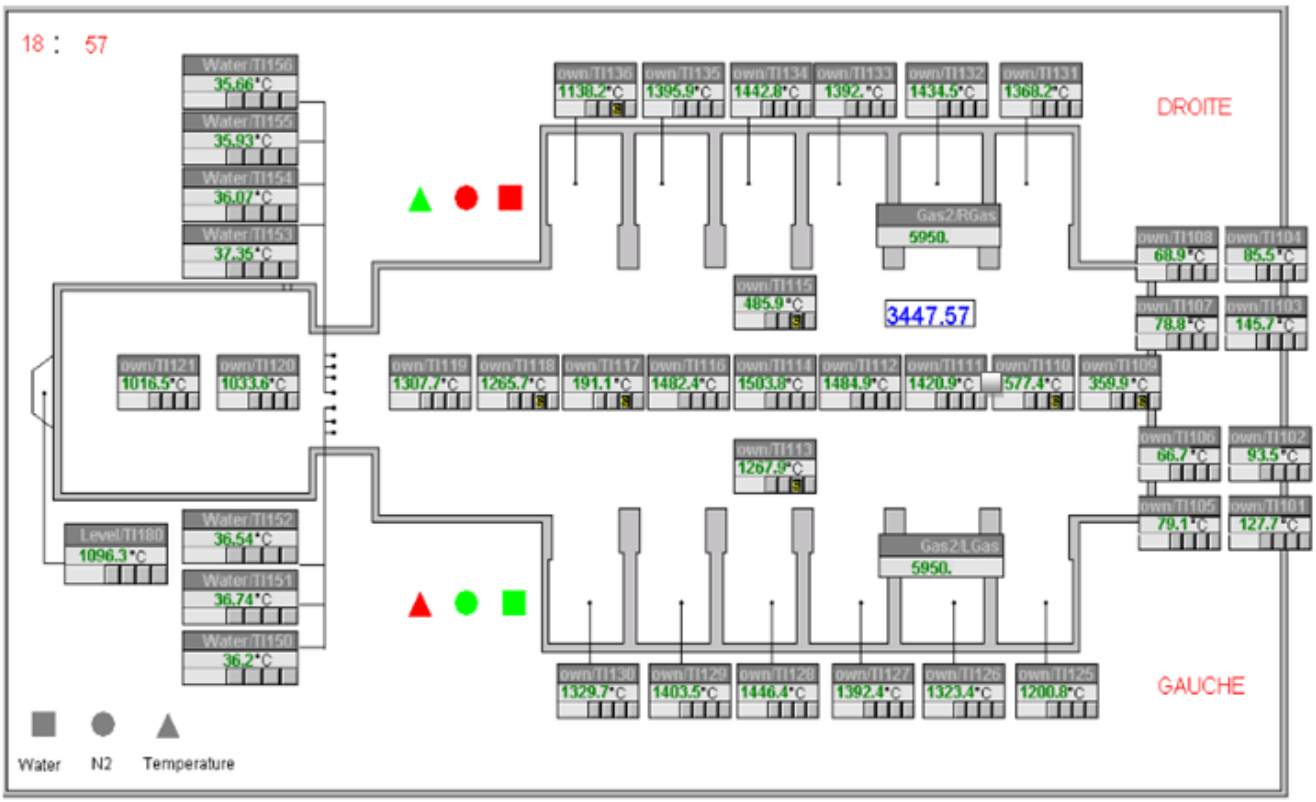


Figure 9 : Les températures de voûte en mois d'avril 2016 [24].

La courbe du feu de la voûte du mois d'avril 2016 pour les températures qu'on doit fixer est présentée dans la figure 10 ci dessous :

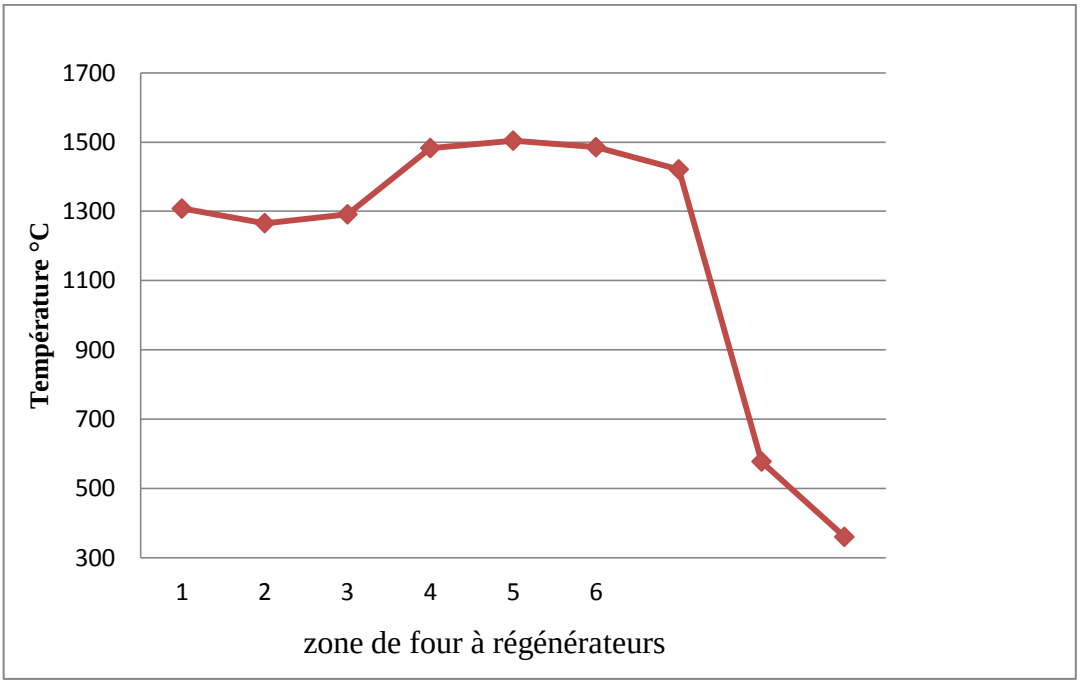


Figure 10: Courbe du feu de voûte en mois d'avril 2016.

III.2 Etude l'influence de la dégradation du four sur le produit fini :

Au niveau du four de fusion, plusieurs types des défauts sont apparus et qui vont influencées directement sur la qualité du produit fini. On identifie la nature des différents défauts issues du four à l'aide du microscope optique au niveau du laboratoire de contrôle qualité. L'analyse et le pourcentage de ces défauts sont retransmis à la production afin de réaliser les ajustages nécessaires des paramètres et améliorer la qualité du produit fini.

Nous allons montrer par ce tableau comparatif N°18, le pourcentage moyen calculé des différents défauts pris dans la base de données pour les années 2011 ,2015 et pendant les trois mois pour l'année 2016 :

Type de défauts	Pourcentage de défauts(%)			Cause probable
L'année	**2011**	**2015**	**2016**	
Bulle d'air	44	62,33	68	-Perturbation des paramètres du four, notamment ceux d'affinage. - La fluctuation de surface de liquide fait varier l'écoulement de verre, et l'air dissout dans le liquide de verre ne peut être évacuée. - L'atmosphère du point chaud est plus oxydée de manière que l'air ne peut être évacué.
Pierre de Zircone	24,25	13,9	13	-Erosion de la brique réfractaire AZS suite à la perturbation du : - Régime thermique du four. - Niveau du verre fondu.
Pierre de corindon	14	6,16	3	-Erosion de la brique d'Argile et celle de la Mullite engendrée suite aux perturbations du régime thermique
Pierre de brique (silice) réfractaire	2	5	3	-Erosion de la brique réfractaire siliceuse suite aux perturbations du régime thermique du four
Trait linéaire optique (Déformation optique)	3	4	6	-Enrichissement en Silice-Alumine d'origine réfractaire (fusion partielle des pierres de la brique AZS)
Pierre de diopside	-	1	1	- Le liquide froid du verre cristallisé à l'angle mort.
Pierre métallique de nature ferrique	1	-	-	- Une Paille de fer oxydé tombée sur le verre fondu au cours de l'opération de fusion (oxydation de l'enfourneuse). -Inclusion de fer, mélangé dans le calcin recyclé.

Tableau N°18 : Calcul du pourcentage des différents défauts du four de fusion.

<u>Analyse de défauts :</u>

L'observation au microscope optique a révélé ces défauts dans verre float. On peut les diviser en trois grandes catégories suivant la position de formage :

1- défauts des matières premières : défauts entrainés par la qualité matières premières et les impuretés extérieures se trouvant dans ces dernières.
2- Défauts de fusion : défauts résultant de mauvaise fusion dans le four.

3- Défauts de matériaux réfractaires : défauts résultant d'érosion fondue de matériaux réfractaires et d'attaque de matériaux réfractaires dans le processus de fusion.

Nous avons illustré les résultats de ces analyses des trois principaux défauts trouvés dans des histogrammes sur les figures 11,14 et 17 qui donnent une comparaison du pourcentage du défaut à travers les années 2011, 2015 et 2016,et nous allons présenter dans ce qui suit ces trois défauts caractéristiques avec leur origine de formation, leurs aspects et leurs microstructures.

a) Bulle d'air :

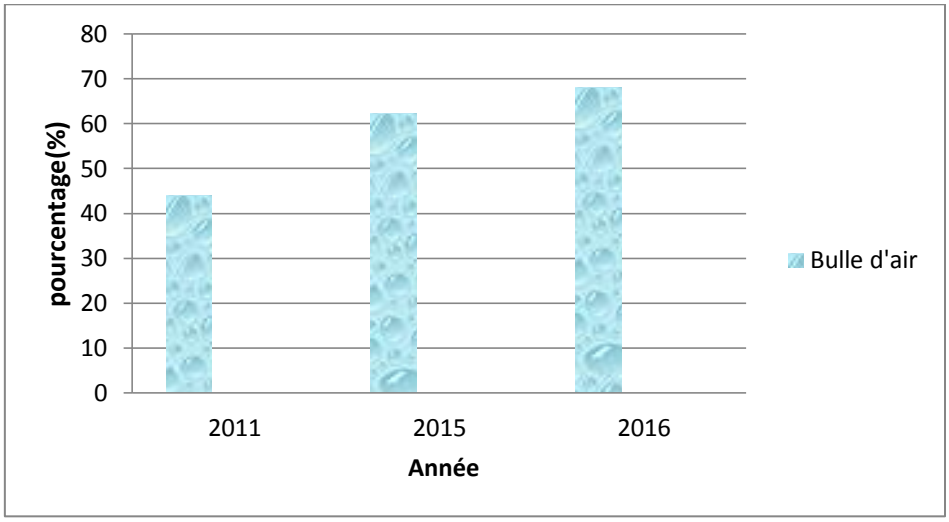


Figure 11: Pourcentage des bulles d'air pour les années 2011,2015et 2016.

Le bulle d'air est un état de gaz qu'on peut voir dans le verre (figure 12, 13). L'origine des bulles et nature des gaz est :

- Air interstitiel et humidification du mélange (O_2, N_2, H_2O).
- Gaz dégagés pendant la fusion, dissolution, combinaison, décomposition chimique en fonction de la température CO, CO_2 Carbonate - SO_2 Sulfates
- Sels volatils, borates, chlorures, fluorures, sulfates S, H_2, H_2S en milieu réducteur
- Au contact verre – réfractaires (parois de cuve).
- Au contact d'inclusions solides dans le verre.

Figure 12: Bulle de soude de sulfate(x 100).

Figure 13: Bulle de soude de sulfate sous lumière orthogonale(x 100).

b) Pierres de Zircon:

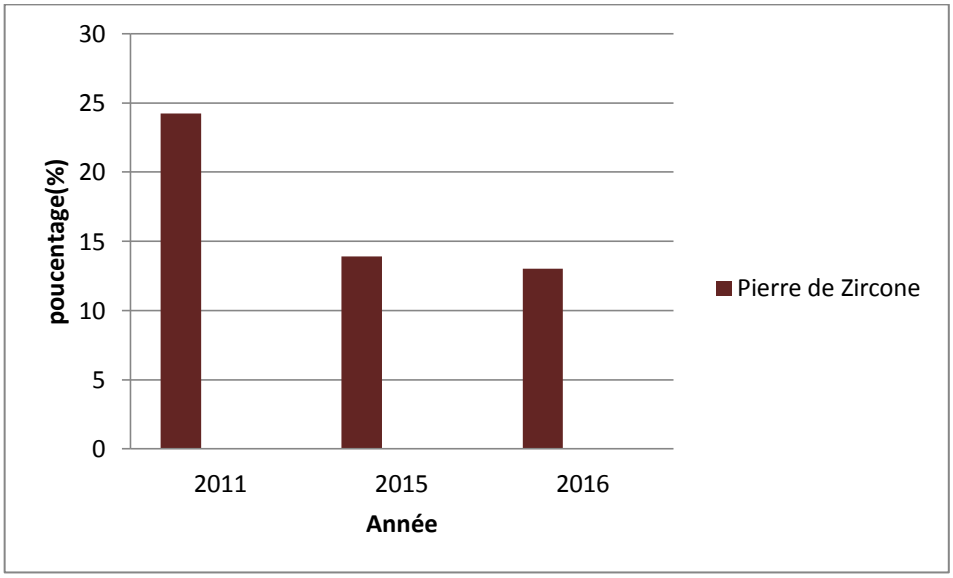


Figure 14 : Pourcentage des pierres de zircone pour les années 2011,2015et 2016.

1. Aspect extérieur :

Les pierres de zircon sont grains plus denses de couleur blanche et/ou grise **[25]**.

2. Microstructure :

Le zircon se divise en zircon primaire et secondaire. La pierre de zircon primaire est un petit grain fin ou en forme d'œuf. Le zircon secondaire est en forme de branche de pin **[25]**, voir les figures 15 et 16.

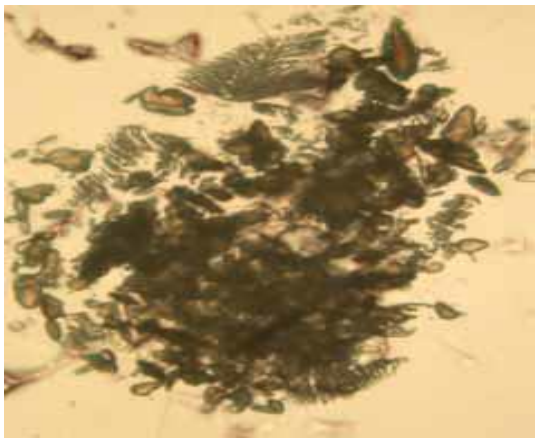


Figure 15 : Zircon primaire en œuf, formation de zirconium(x 100).

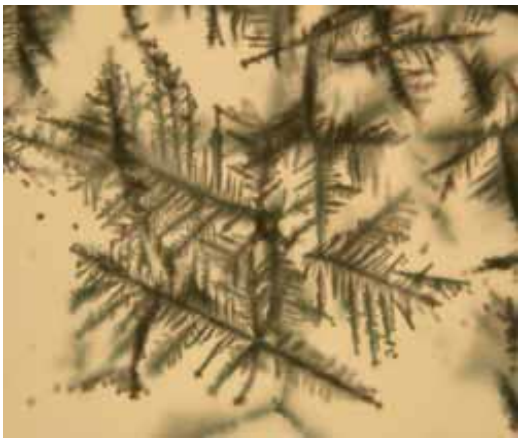


Figure 16: Zircon secondaire(x 100).

c) Pierres de corindon :

Figure 17: Pourcentage des pierres de corindon pour les années 2011,2015et 2016.

1. Aspect extérieur :

Le corindon est en forme grain dense en blanc sur la surface de ruban de verre **[25].**

2. Microstructure :

La pierre de corindon est dense de forme ronde. Il y a des grains de cavolinite à côté de la pierre et qui sont libérés en forme colonne et plaque **[25].** Voir les figures 18 et 19 de corindon suivant :

Figure 18: Pierre de corindon granulaire de nature Al-Si(x 100).

Figure 19: Pierre de corindon sous lumières orthogonale(x 100).

<u>Interprétation des résultats :</u>

L'augmentation des bulles d'air à abouti à un pourcentage de ceci 68% en 2016, s'explique par la grande consommation de gaz (151 043 m^3/j) qui a causé des fluctuations et des perturbations des

courant du verre liquide lors de l'écoulement de ce dernier, donc n'a pas donne assez de temps pour l'évacuation des gaz où sont prisonnés dans le ruban du verre.

Par contre, les pierres de zircone et de corindon ont connues une diminution relative à travers les années à cause des rectifications dans le four de fusion, fait en 2015 par une équipe professionnelle des fumistes, qui a empêché une dégradation plus grande du four.

III.3 Influence des matières premières :

Concernant le sable, c'est la matière première par excellence pour la formation du verre, qui a eu beaucoup de changements par rapport aux autres. Nous allons concentrer l'étude sur l'influence des deux derniers paramètres (la granulométrie, l'humidité) compte tenu de la stabilité chimique du sable durant les années de l'exploitation du four.

III.3.1 Analyse granulométrique :

Toutes les analyses granulométriques des différents matières premières (le sable, la dolomie, le calcaire) sont effectuées au niveau de laboratoire de contrôle qualité de MFG.

a- Mode opératoire d'analyse granulométrique :

Pour effectuer une analyse granulométrique on doit suivre la méthode en dessous:

- On pèse un échantillon de sable à l'aide d'une balance électrique de grande précision, l'échantillon à analyser doit être représentatif, pour cela on doit homogénéiser ce dernier et prendre plusieurs prélèvements des différents points.
- On effectue un séchage l'échantillon dans une étuve de séchage (figure 20) pendant 1h à 105℃.
- On refroidi l'échantillon à l'air libre pendant 15 minutes, après on le met dans un diviseur rotatif type *(PT-100)* (Figure 21).
- La dernière étape on fait un tamisage de l'échantillon à l'aide d'un tamiseur type *(Retsch AS200)*, puis on détermine le refus dans chaque tamis (figure22) par la relation suivante :

$$\text{Refus (\%)} = \frac{m2-m1}{M} * 100 \quad \text{.....(24)}$$

Où :

- m_1:la masse des tamis vide.
- m_2:la masse des tamis remplis avec l'échantillon de la matière première à analysée
- M: la masse d'échantillon à analysé.

Figure 20: Etuve de séchage.

Figure 21 : Deviseur rotatif modèle (PT100).

Figure 22: Tamiseur Retsch AS200.

b- Analyse de la granulométrie du sable :

D'après les données récoltées à MFG, nous avons représenté dans le tableau N° 19 les résultats des mesures de la moyenne annuelle de la granulométrique du sable des années 2011, 2015 et 2016. Ces derniers nous ont permis de tracer une comparaison de la taille moyenne de granulométrie du sable pour les mêmes années (figure 23).

Ouverture Tamis (µm)	La Moyenne de la granulométrie du sable en pourcentage(%)										
	2000	1000	630	500	400	315	250	200	160	106	Passant <106
exigences	0	0	0	< 2	<5	10 ÷15	25÷30	35÷40	10÷15	< 5	0
2011 (Tébessa)	0	0	0,16	_	13,79	16,62	21,69	17,45	11,08	13,97	4,87
2015 (Ain Oussara)	0	0	0,07	1,78	9,59	24,16	29,41	19,95	9,39	6,06	1,1
2016 (Ain Oussara)	0	0	0,06	1,27	6,92	23,79	32,85	21,65	7,72	4,86	0,87

Tableau N°19 : Résultats d'analyse granulométrique pour le sable.

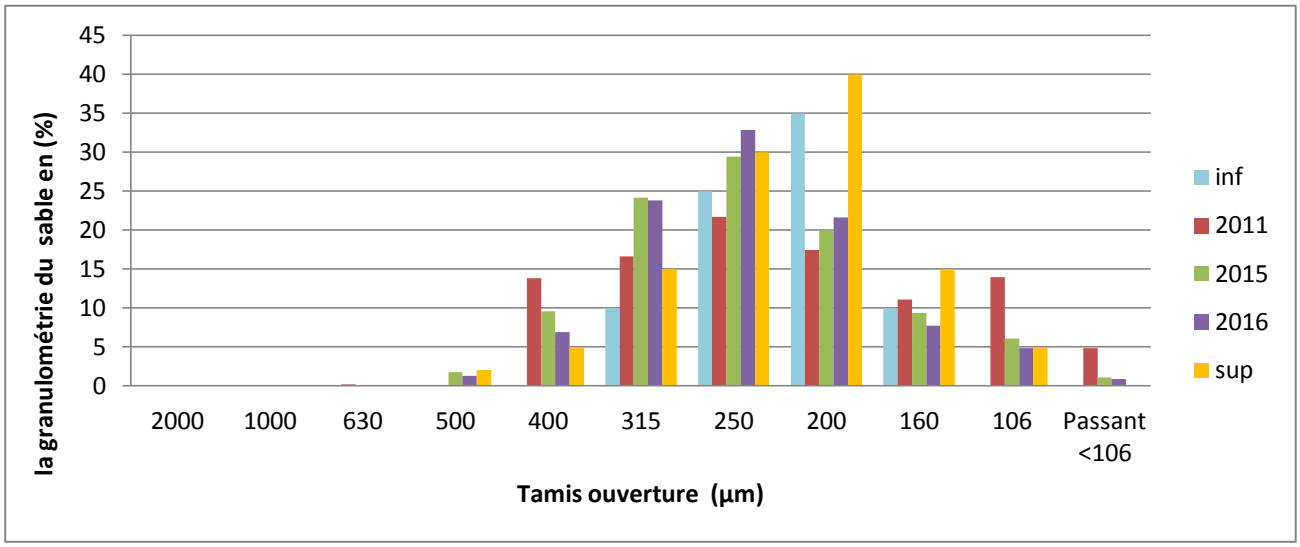


Figure 23 : Granulométrie moyenne du sable en (%) pour les années 2011, 2015et 2016.

<u>Interprétation des résultats:</u>

Pour avoir une bonne fusion dans l'industrie verrière, le sable doit comporter un maximum de particules entre 250µm et 200µm à raison de 60% à 70%. Comme déjà mentionné plus haut, MFG a changé l'origine du sable plusieurs fois pour des raisons économiques et techniques. Le passage au sable local en février 2010 (mise en service de la station de traitement de sable) a permis la réduction des charges d'importation et achat à plus de 50%. Mais le sable local, après traitement, n'est pas conforme aux exigences d'exploitation du four.

Le sable de Tébessa utilisé en 2011 est riche en grosses particules du (30% sup à 315µm) et riche en fines particules (19% moins de 106µm). Le colmatage des fines particules induit à la création des grosses particules au niveau du mélange et par conséquent, l'augmentation de la consommation énergétique. Le bouchage des mailles des briques d'empilage des chambres de régénération provoque l'augmentation de la pression du four et l'augmentation des bulles d'air dans le produit fini.

L'utilisation du sable d'Ain Oussara a permis de réduire le pourcentage des fines particules nocives pour le four, mais son principal inconvénient est la présence des grosses particules (35% sup à 315µm) qui nécessitent l'augmentation de la température de fusion et par conséquent, l'augmentation du débit de gaz.

L'introduction des matières locales dans la fabrication du verre MFG a touché aussi le calcaire (Khroub-Constantine) et la dolomie (Bordj Bou Arréridj).

c- Analyse de la granulométrie du calcaire :

Les mêmes mesures récoltées d'analyse granulométrique du calcaire sont données dans le tableau N° 20 en dessous. Nous avons aussi tracé une comparaison de la taille moyenne de granulométrie du calcaire sur la figure 24 pour les mêmes années.

Tamis ouverture (µm)	la moyenne de la granulométrie du calcaire en pourcentage(%)							
	2000µm	1000µm	630µm	400µm	200µm	160µm	106µm	Passant <106
les exigences	**0**	**20 ÷ 30**	**15 ÷ 20**	**12 ÷ 18**	**15 ÷ 20**	**10 ÷ 15**	**_**	**≤6**
2011	0,00	12,97	26,33	31,59	20,23	2,37	3,48	2,81
2015	0,00	13,27	21,49	23,28	31,67	3,61	3,98	2,69
2016	0,00	13,71	22,83	23,25	31,40	2,91	3,54	2,34

Tableau N°20: Moyenne de granulométrie du calcaire en (%) pour les années 2011,2015et 2016.

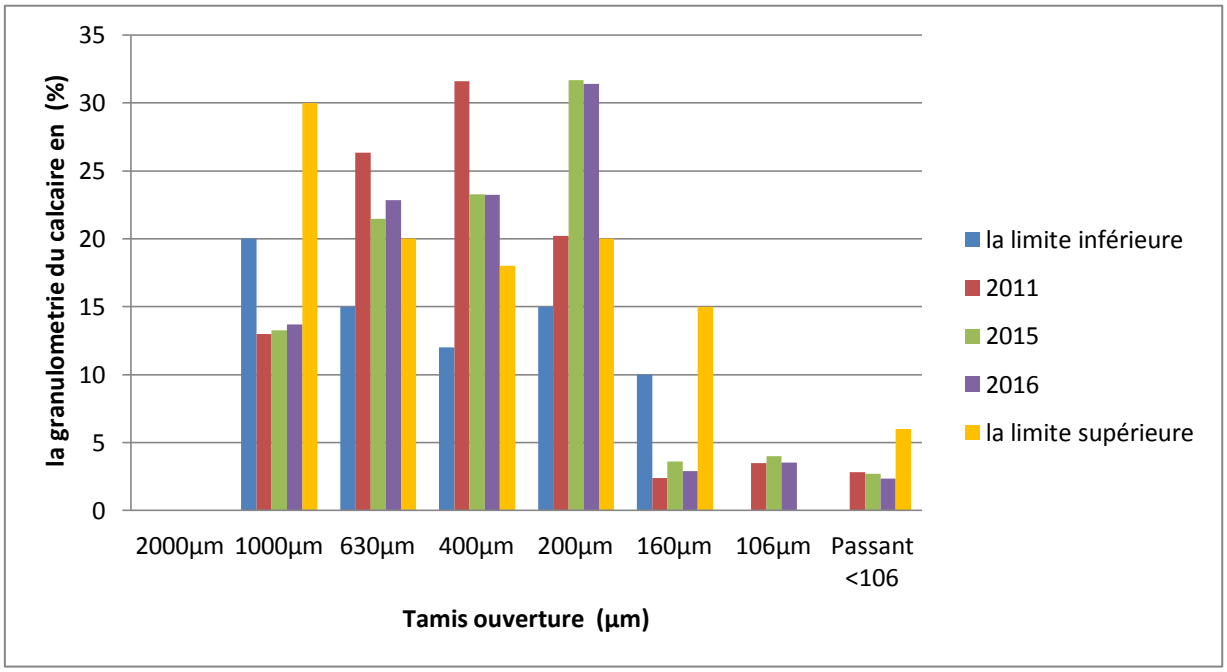


Figure 24: Granulométrie moyenne du calcaire en (%) pour les années 2011, 2015et 2016.

<u>Interprétations des résultats :</u>

Le calcaire entre fusion à une température avoisinant 825°C. En comparant les résultats d'analyse granulométrique et les exigences, on trouve que le calcaire possède des grosses particules du 630µm, 400µm, 200µm pour les années 2011, 2015 et 2016 (78% au lieu de 50% de la somme des valeurs supérieures). Ceci induit inévitablement à l'augmentation de la consommation énergétique.

d- Analyse de la granulométrie de dolomie :

Les mesures récoltées d'analyse granulométrique pour la dolomie sont données dans le tableau N° 21 en dessous. Nous avons aussi tracé une comparaison de la taille moyenne de granulométrie de la dolomie sur la figure 25 pour les mêmes années.

Tamis ouverture (µm)	la moyenne de la granulométrie de la dolomie en pourcentage(%)							
	2000µm	1000µm	630µm	400µm	200µm	160µm	106µm	Passant <106
les exigences	**0**	**20 ÷ 25**	**10 ÷ 15**	**12 ÷ 18**	**20 ÷ 25**	**10 ÷ 15**	**5 ÷10**	**≤6**
2011	0,08	25,46	18,62	15,13	22,51	4,64	7,60	5,66
2015	0,09	31,72	16,22	15,14	21,99	5,21	6,26	3,36
2016	0,18	35,91	16,17	13,83	20,18	5,05	5,87	2,81

Tableau N°21 : Moyenne de granulométrie de la dolomie en (%) pour les années 2011,2015et 2016.

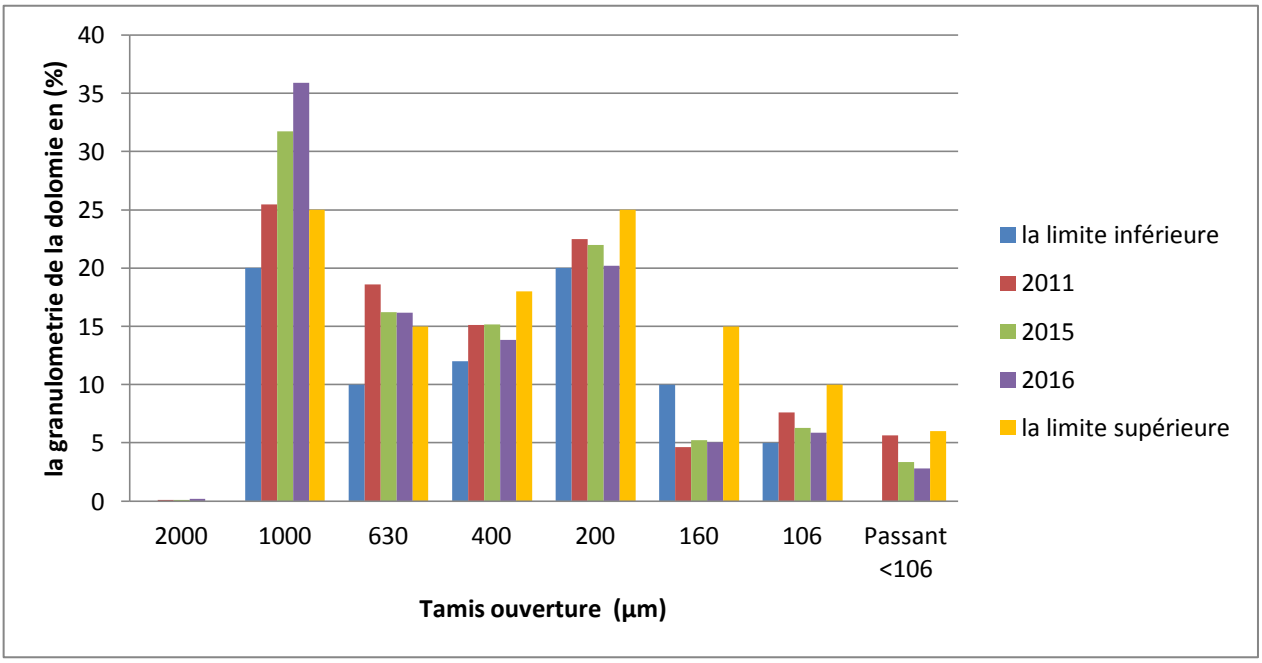


Figure 25: Granulométrie moyenne de la dolomie en (%) pour les années 2011, 2015et 2016.

<u>Interprétations des résultats:</u>

La dolomie locale a 10% de plus de grosses particules (1000µm) par rapport à l'exigence. Même incidence sur la consommation énergétique que le sable et le calcaire.

e- Conclusion :

La granulométrie joue un rôle très important dans la fusion du mélange vitrifiable. L'augmentation des particules dans les matières induit inévitablement à l'augmentation de la consommation énergétique au niveau du four. Une surconsommation en gaz implique une dégradation rapide du four

(réduction de la longévité) et à l'apparition de plusieurs défauts type tel que : les pierres, les bulles (réduction du rendement et de la qualité production).

III.3.2 Analyse d'humidité des matières premières (sable, calcaire, dolomie) :

L'humidité : est la présence d'eau ou de vapeur d'eau dans une matière. Elle peut être mesurée grâce à un hygromètre à cheveu ou numérique et est exprimée en pourcentage le plus souvent.

a- Mode opératoire d'analyse d'humidité :

1. On prend un échantillon de matière première (sable, calcaire, dolomie) et on le met dans un appareil appelée un dessiccateur infrarouge (figure 26).
2. On attend la stabilité des chiffres pendant 3-4 minutes.
3. On lis la valeur de l'humidité.

Figure 26 : Appareil de mesure d'humidité (dessiccateur infrarouge).

b- Analyse de l'humidité du sable :

Les mesures récoltées d'analyse d'humidité pour le sable sont données dans le tableau N° 22 en dessous. Aussi, nous avons illustré les résultats de ces analyses dans un histogramme pour une meilleure visibilité qui donne une comparaison d'humidité sur la figure 27 pour les années 2011, 2015 et 2016.

	2011	2015	2016
l'exigence	**≤ 3**	**≤ 3**	**≤ 3**
la moyenne d'humidité du sable	6,29	4,75	4,24

Tableau N°22 : Moyenne d'humidité du sable en (%) pour les années 2011,2015et 2016.

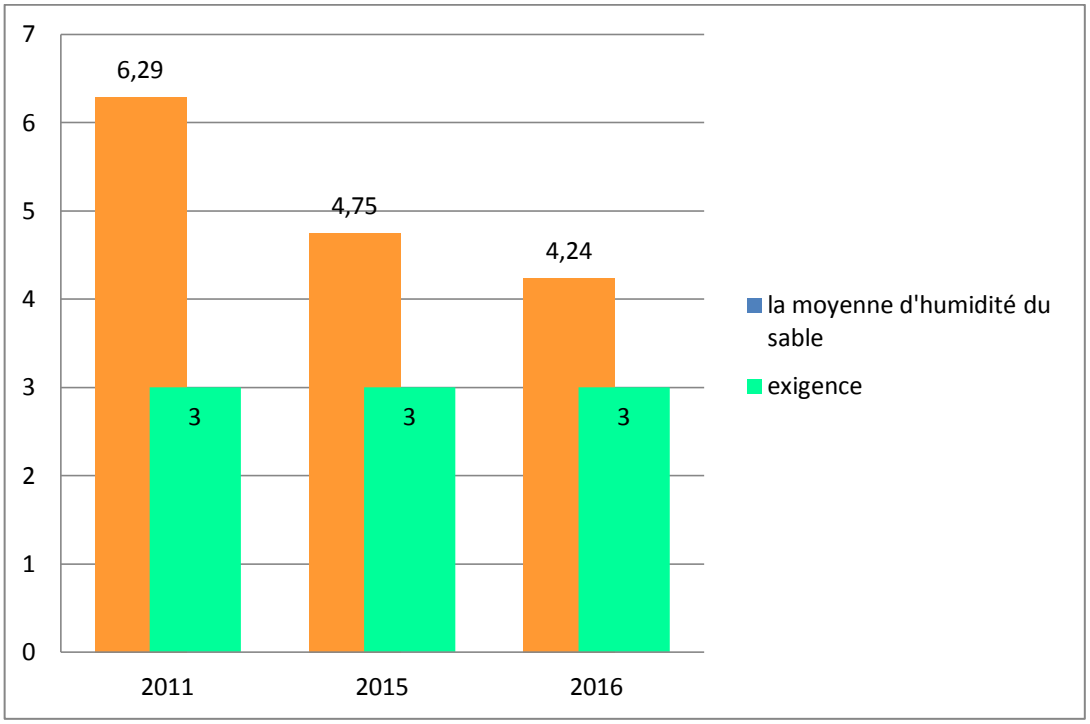


Figure 27: Moyenne d'humidité du sable en (%) pour les années 2011,2015et 2016.

<u>Interprétation des résultats:</u>

Le taux d'humidité du sable dépasse de beaucoup le seuil de l'exigence du process qui est de 3%. Cette humidité élevée contribue à l'augmentation de la consommation énergétique du four.

c- Analyse de l'humidité du calcaire :

Les mêmes analyse d'humidité a été faite pour le calcaire, les résultats sont données dans le tableau N° 23 en dessous. Aussi, nous avons illustré les résultats de ces analyses dans un histogramme qui donne une comparaison d'humidité sur la figure 28 pour les années 2011, 2015 et 2016.

	2011	2015	2016
l'exigence	**≤1.0**	**≤1.0**	**≤1.0**
la moyenne d'humidité du Carbonate de calcium (%)	0,05	0,10	0,06

Tableau N°23 : Moyenne d'humidité du calcaire en (%) pour les années 2011,2015et 2016.

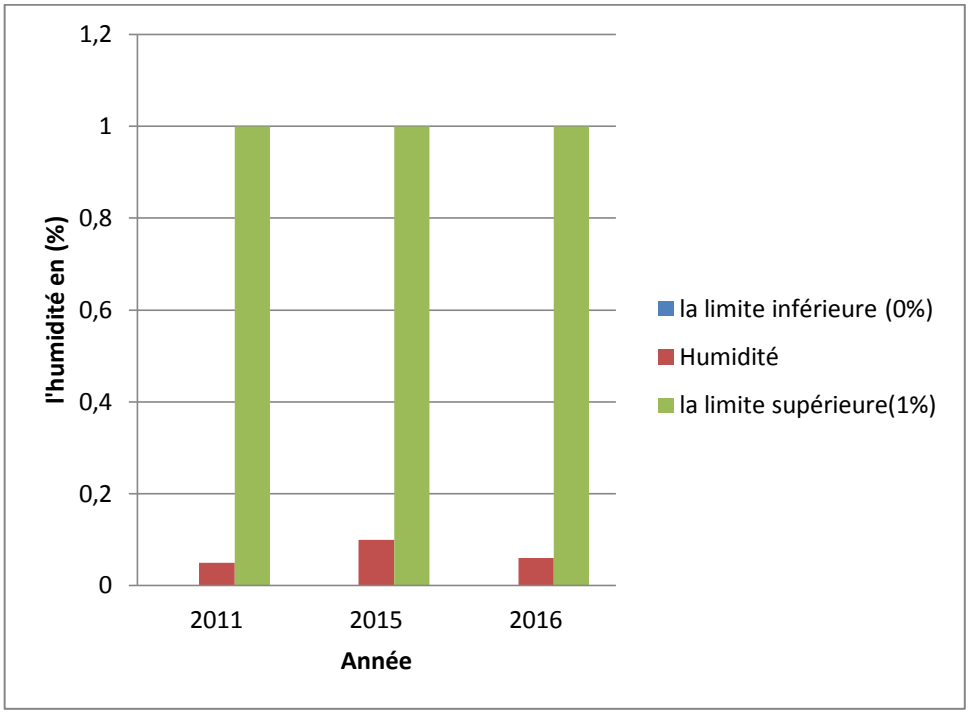


Figure 28 : Moyenne d'humidité du calcaire en (%) pour les années 2011,2015et 2016.

<u>Interprétation des résultats:</u>

Nous pouvons avoir que l'humidité du calcaire est très faible, donc son influence est négligeable sur la consommation énergétique.

d- Analyse de l'humidité de la dolomie :

Les mesures récoltées d'analyse d'humidité pour la dolomie sont données dans le tableau N° 24 en dessous. Aussi, nous avons illustré les résultats de ces analyses dans un histogramme qui donne une comparaison d'humidité sur la figure 29 pour les années 2011, 2015 et 2016.

	2011	2015	2016
l'exigence	**≤0,5**	**≤0,5**	**≤0,5**
la moyenne d'humidité de la dolomie	0,06	0,17	0,08

Tableau N°24 : Moyenne d'humidité de la dolomie en (%) pour les années 2011,2015et 2016.

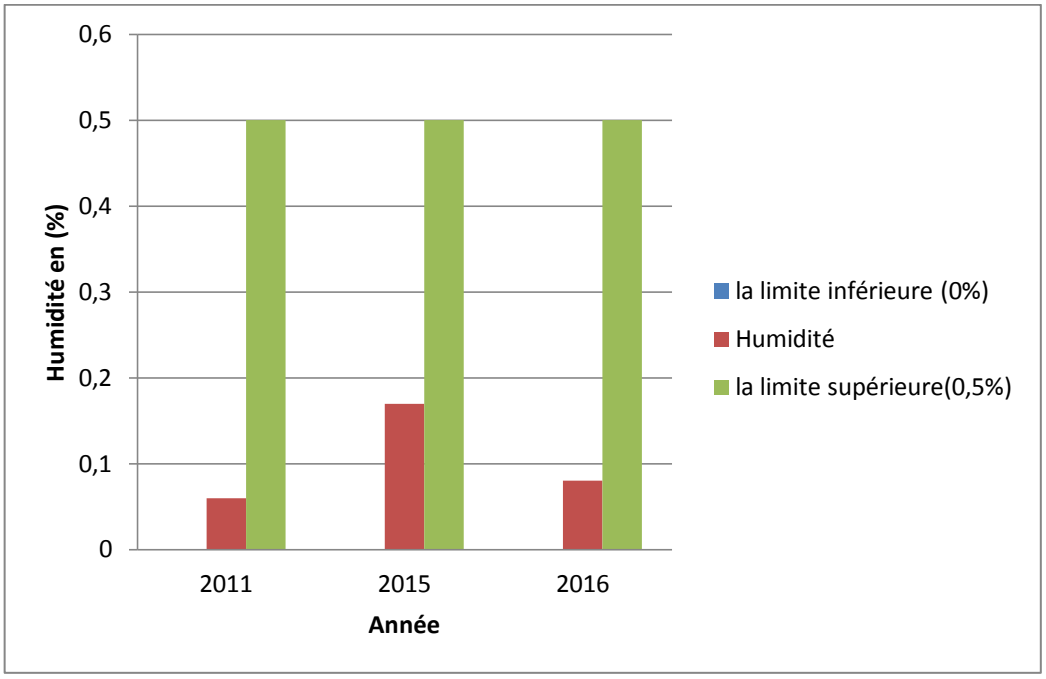


Figure 29: Moyenne d'humidité de la dolomie en (%) pour les années 2011,2015et 2016.

<u>Interprétation des résultats:</u>

Nous observons que le taux d'humidité de la dolomie reste toujours faible pendant tous les années d'étude, donc il n'y a pas d'influence sur la consommation énergétique.

e- Conclusion :

Pour les matières déjà traitées (en big-bags), l'humidité est très négligeable et n'a pas beaucoup d'influence sur la consommation énergétique. A l'opposé du sable, ou l'humidité de ce dernier influe directement sur la consommation en gaz. Ceci est dû probablement à ce que le traitement de sable réalisé à MFG est obtenu par voie humide.

La diminution humidité relative entre les années vient du fait que le rendement de la production du sable Tébessa est très bas par rapport à celui d'Ain Oussara, la granulométrie du sable influe aussi sur l'humidité, plus les grains du sable sont grosses, plus la décantation est favorable, plus l'humidité est réduite.

CONCLUSION GENERALE

Le four de fusion MFG est conçu pour un tirage de 600 tonnes/jour. L'étude réalisée à la conception et au commencent de la production était basée sur une composition de matières premières conformes et importées de l'étranger. La consommation énergétique au démarrage était régie selon l'étude initiale réalisée soit 1651 Kcal/Kg pour une tirée de 600 tonnes/jour.

Au fil du temps, MFG a changé l'origine du sable à plusieurs reprises pour des raisons purement économique. En effet, le sable importé valait 9 800DA/T, alors que le sable local coûte moins de 4 200DA/T pour une consommation journalière de sable près de 325T, soit un gain annuel de 664 300 000DA.

Même si le sable local est convainquant de point de vue de sa composition chimique, il est toutefois très loin des exigences techniques concernant sa granulométrie ou son humidité. Ces deux paramètres influent négativement sur la consommation énergétique. La surconsommation de gaz cause des dégâts irréversibles au four de fusion. A rappeler que la vie d'une entreprise de verre est calculée suivant la durée de vie de son four.

La dégradation du four a engendré les situations suivantes :

- Diminution de la capacité de tirage journalier de l'entreprise, soit 530t/j au lieu de 600 t/j au moment du stage.

-Augmentation progressive des défauts de qualité, en conséquence une diminution du rendement de production, soit une diminution des revenus.

-Diminution de la longévité du four initialement conçu pour 10 ans, l'effectif œuvrant, au niveau de la ligne, projette de faire durer le four à 12 ans voir 13 ans de fonctionnement.

Notre étude s'inscrit beaucoup plus dans ce dernier but et selon la méthodologie du calcul de la consommation énergétique, le débit spécifique doit être recalculé suivant les nouvelles données des matières premières introduites. Le débit spécifique est de l'ordre de 2 070Kcal/Kg initialement prévu. En suivant les consignes du process, la consommation énergétique est maitrisée durant l'année 2016. La température de fusion étant dans la limite maximale du processus, la diminution de la tirée est recommandée pour ne pas dégrader le four d'avantage et c'est ce qui est réalisé.

Nous avons aussi commencé d'étudier l'influence des rejets polluantes dans l'atmosphère sur la dégradation du four, mais nous n'avons pas pu la terminée, à cause de la durée très limitée du stage, mais nous pouvons donner les polluants les plus courants, lors de nos analyses, du four

verrier et qui sont : les **oxydes de soufre** (SO_2 et SO_3), les **oxydes d'azote** (NO, NO_2, N_2O), les **poussières** en provenance du combustible, et l'**oxyde de carbone**.

Avec le lancement de la deuxième ligne de production à 800tonnes /jour, la première ligne de production float vas être reconvertie à la production du verre coloré dans la masse avec quatre couleurs prévues, à l'occurrence verte, grise, bleue claire et foncée. Cette conversion nécessite une augmentation de la consommation énergétique mais une réduction systématique de la tirée.

Afin de faire fonctionner le four le plus longtemps possible tout en augmentant le tirage journalier, des recommandations vont être émises ci-après :

1. En vue de diminuer l'humidité du sable traité, la station de traitement de sable doit être dotée d'un appareil de séchage à la fin du processus. L'humidité est dans les consignes du process de la fusion, à hauteur de 2 à 3 %. Un séchoir étant un équipement très cher, il y a lieu à réaliser une chape dans le dépôt du sable avec une inclinaison étudiée pour que la décantation du sable soit très rapide et par conséquence l'humidité très faible.

   On peut aussi récupérer les fumées sortantes du four dans un conduit et les acheminées vers le dépôt de sable pour le sécher. Les fumées sortent à une température avoisinant les 500°C.
2. Concernant la grosseur des grains du sable, un jeu de tamis pour éliminer les grosses et fine particules est indispensable. Les fines particules bouchent irréversiblement les mailles des régénérateurs du four, ce qui influe sur la pression. MFG a signé une réparation à chaud qui consiste à faire remplacer certaines rangée d'empilage (prévue mois de juillet 2016).
   L'installation du tamis aura peut-être une incidence sur le rendement du sable, la mise en place d'un broyeur va éliminer ce problème aussi. A rappeler, un bon sable a une granulométrie de 200-250µm entre 60 à 70%.

3. Réaliser plus de contrat avec des équipes professionnelles dans la réfection des fours. Leurs travaux ne vont pas consisté qu'à colmater les fuites de chaleurs des briques réfractaire mais aussi à l'apprentissage de l'équipe fumisterie de MFG. Ajouter à cela, la prise en connaissance des nouvelles techniques et matériaux utilisés dans les réfections. Exemple, pour le blindage du four à utiliser les briques THTZ (très haut teneur en zircone) qui sont plus coûteuses, mais à longue terme, on va gagner de l'argent perdue a chaque action de la réfection, les THTZ donnent un résultat très satisfaisant chez les

exploitants et aussi il faut changer le ciment utilisé actuellement vers un ciment plus performant (ciment d'étanchéité).

4. Stabilisation des courants convectifs par la stabilisation du régime thermique de l'affinage et la stabilisation du niveau du verre fondu.

5. La conduite du gaz étant loin du four et exposée à l'air libre influe sur la consommation énergétique sur tout dans les saisons chaude du fait de l'équation : P V=n R T, donc plus la température augment la consommation augmente. Aussi, un calorifugeage de la tuyauterie va impérativement stabiliser le flux de gaz introduit dans le four.

Références bibliographiques :

[1] *Universite Aboubekr Belkaid faculté des sciences de l'ingénieur« science des matériaux de construction»*

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

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

[4] *European Glass Industry, janvier 1998.*

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

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

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

[8] *Schoize H, 'Le verre, nature, structure et propriétés". institut du verre Paris, (1980).*

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

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

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

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

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

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

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

[16] *Saint-Gobain Glas,« Definition von Glas» Beitrag-2005.*

[17] *Heinz G. Pfaender « Schott guide to glass » 1996, 2e édition.*

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

[19] *M. Yamane et Y. Asahara,« Glasses for Photonics » Press Cambridge University 2000.*

[20] *J. Fourment et J. Fromentin. Fours de verrerie. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie Energétique, BE 8848, 2000.*

[21] *SIMS R., Technologie de fusion du verre SORG, Verre 8 (3), 32–38 (2002).*

[22] *Glossaire et Banque Hydro, le 8 juin 2012.*

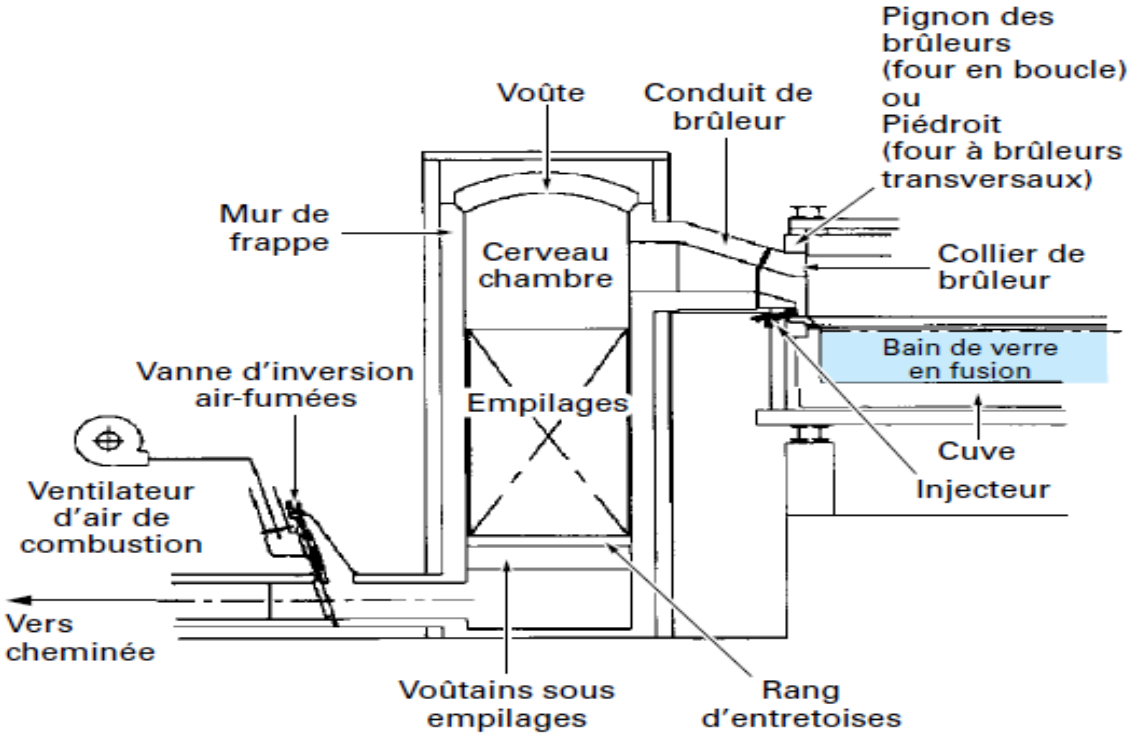
[23] *J.-P. Eberhart «Analyse structurale et chimique des matériaux » éd. Dunod (Paris), 1997.*

[24] *Documentation interne du l'usine MFG (CLFG : China Luoyang Float Glass):unité de production verre float.*

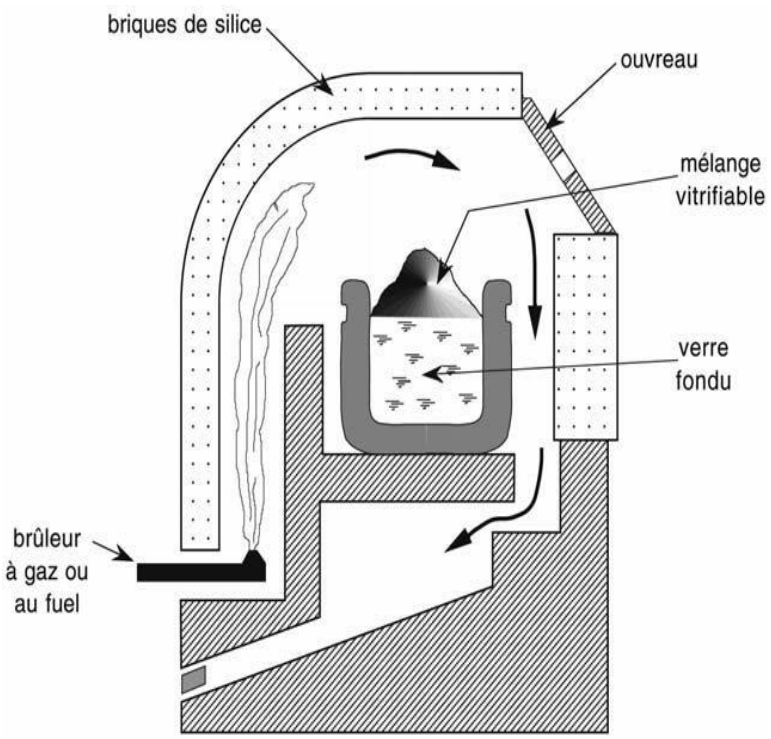
[25] *Documentation interne du l'usine MFG : laboratoire centrale.*

ANNEXES

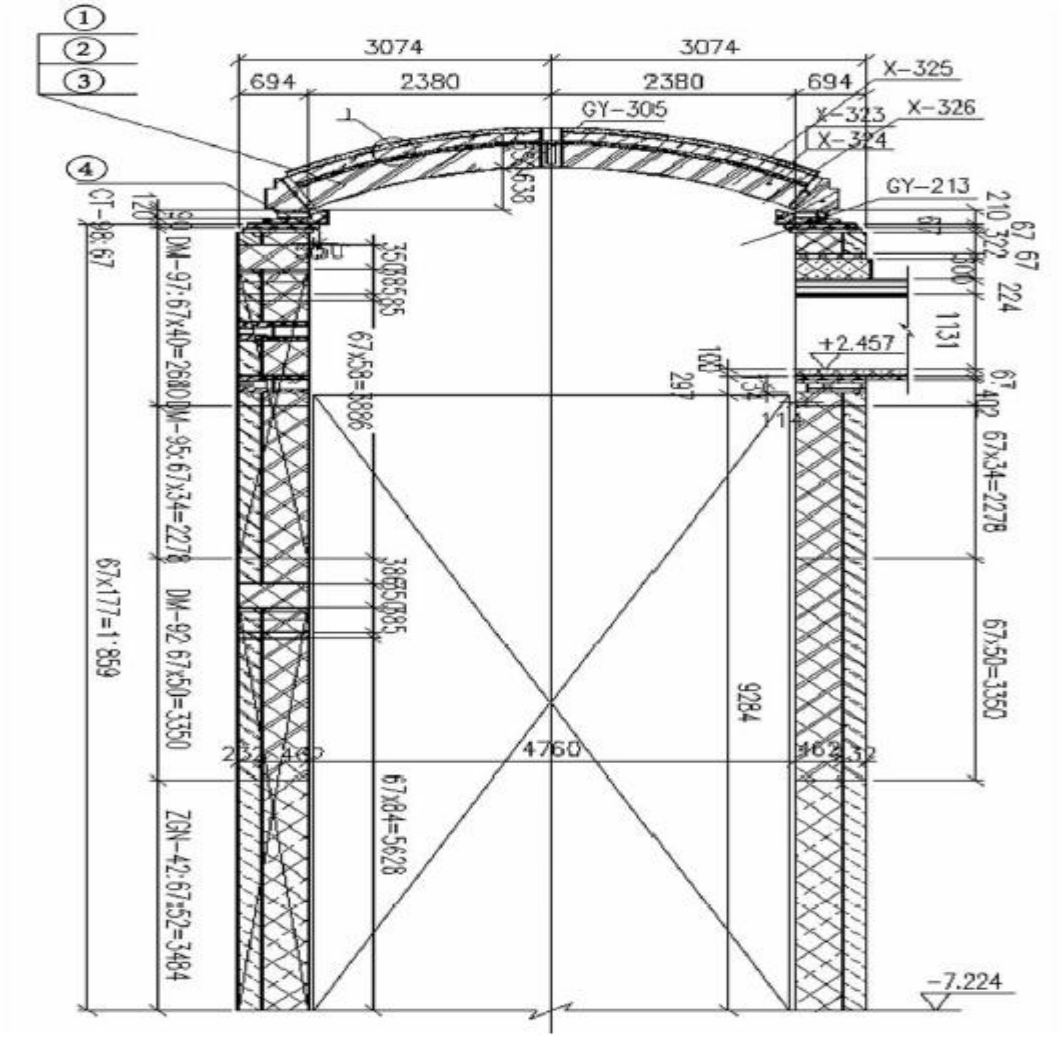
ANNEXE N°1 : Chambre de régénérateur



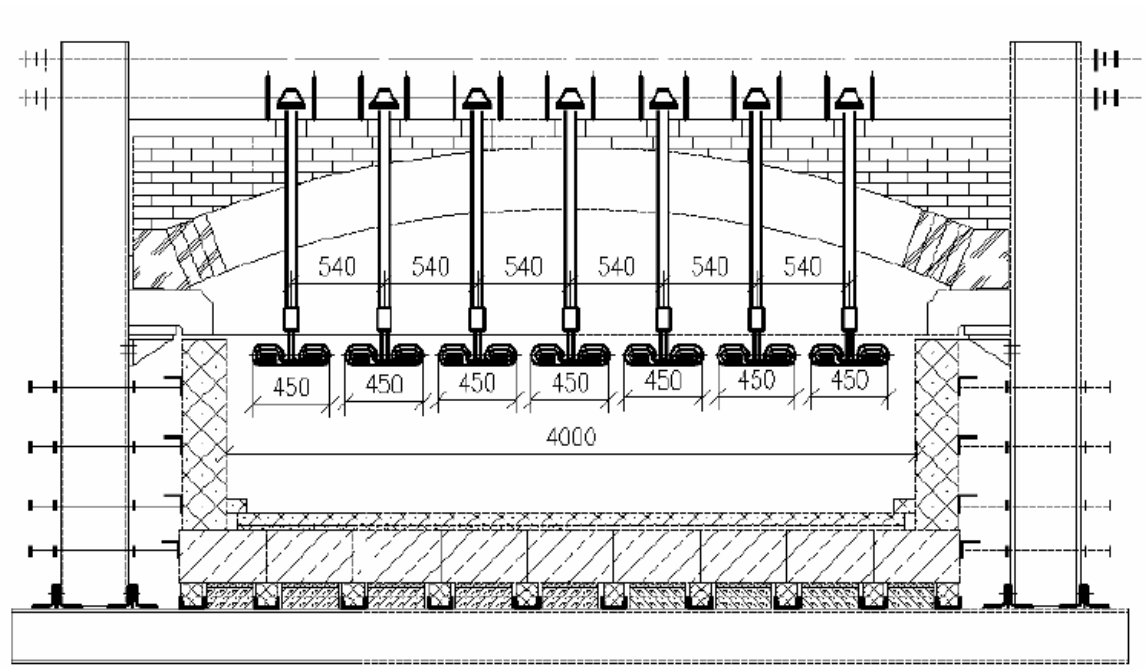
ANNEXE N°2 : Four à pot moderne



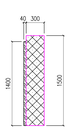
ANNEXE N°3: Coupe de la chambre de régénération



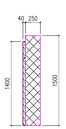
ANNEXE N°4 : Coupe de la gorge



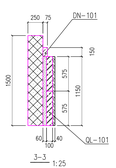
ANNEXE N°5:Rangement des briques réfractaires du four MFG.



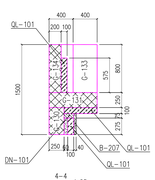
1—1 1:25



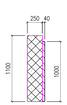
2—2 1:25



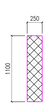
3—3 1:25



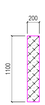
4—4 1:25



5—5 1:25



6—6 1:25



7—7, 8—8, 9—9 1:25

NO.	NO. DE PLAN	NO. DE PIÈCE	DÉSIGNATION	NATURE ET SPECIFICATION	UNITÉ	QUANTITÉ	POID (kg) UNIQUE	POID (kg) TOTAL	OBSERVATION
37	SANS PLAN	B-207	PLAQUE D'ISOLATION	PLAQUE EN SILICIUM ET CALCIUM SANS AMIANTE HCS-23	MÈTRE(M)	5	1.278	6.390	350X397X40
36	SANS PLAN	B-206	PLAQUE D'ISOLATION	PLAQUE EN SILICIUM ET CALCIUM SANS AMIANTE HCS-23	MÈTRE(M)	195	4.200	819.0	1150X397X40
35	SANS PLAN	B-205	PLAQUE D'ISOLATION	PLAQUE EN SILICIUM ET CALCIUM SANS AMIANTE HCS-23	MÈTRE(M)	2	3.220	6.440	1000X1500X40
34	SANS PLAN	B-204	PLAQUE D'ISOLATION	PLAQUE EN SILICIUM ET CALCIUM SANS AMIANTE HCS-23	MÈTRE(M)	8	3.450	27.60	1000X1725X40
33	SANS PLAN	B-203	PLAQUE D'ISOLATION	PLAQUE EN SILICIUM ET CALCIUM SANS AMIANTE HCS-23	MÈTRE(M)	6	3.910	23.46	1000X1425X40
32	SANS PLAN	B-202	PLAQUE D'ISOLATION	PLAQUE EN SILICIUM ET CALCIUM SANS AMIANTE HCS-23	MÈTRE(M)	12	4.830	57.96	1400X1725X40
31	SANS PLAN	B-201	PLAQUE D'ISOLATION	PLAQUE EN SILICIUM ET CALCIUM SANS AMIANTE HCS-23	MÈTRE(M)	28	4.959	138.85	1400X3850X40
30	SANS PLAN		MATÉRIAU ÉTÉINCHETÉ	MATÉRIAUX ÉTÉINCHETÉ EN ZIRCONIA	m3	1.50	3200	17600	
29	SANS PLAN	QL-101	BRIQUE D'ISOLATION	BRIQUES D'ALUMINIUM p=1.2	MÈTRE(M)	360	31.05	11178	575X450X100
28	SANS PLAN	DN-101	BRIQUES SUR LA PAROI DE BASSIN	BRIQUES DE CORINDON BLANC 22A-4C	MÈTRE(M)	198	10.04	1987.92	375X150X75
27	DKD.KBA.KL.01.002	G-107	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	JARGAL M RT	MÈTRE(M)	10	250.41	2504.10	
26	DKD.KBA.KL.01.002	G-106	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	JARGAL M RN	MÈTRE(M)	2	293.26	586.52	
25	DKD.KBA.KL.01.002	G-105	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	JARGAL M RN	MÈTRE(M)	2	293.26	586.52	
24	DKD.KBA.KL.01.002	G-104	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	JARGAL M RN	MÈTRE(M)	2	243.74	487.48	
23	DKD.KBA.KL.01.002	G-103	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	JARGAL M RN	MÈTRE(M)	2	392.29	784.58	
22	DKD.KBA.KL.01.002	G-102*	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	JARGAL M RN	MÈTRE(M)	2	244.09	488.18	HOMMAGE DE LA FACE A
21	DKD.KBA.KL.01.002	G-102	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	JARGAL M RN	MÈTRE(M)	16	244.09	3905.44	
20	DKD.KBA.KL.01.002	G-101*	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	JARGAL M RN	MÈTRE(M)	2	278.96	557.92	HOMMAGE DE LA FACE A
19	DKD.KBA.KL.01.002	G-101	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	JARGAL M RN	MÈTRE(M)	72	278.96	20085.12	
18	DKD.KBA.KL.01.002	G-134	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	G36 p	PAVÉ SANS REDACTION ET AVEC METHODE EXTENSIONN	MÈTRE(M)	3	241.98	725.94
17	DKD.KBA.KL.01.002	G-133	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	G36 p	PAVÉ SANS REDACTION ET AVEC METHODE EXTENSIONN	MÈTRE(M)	2	364.80	729.60
16	DKD.KBA.KL.01.002	G-132	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	G41 p	PAVÉ SANS REDACTION ET AVEC METHODE EXTENSIONN	MÈTRE(M)	2	464.00	928.00
15	DKD.KBA.KL.01.002	G-131	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	G41 p	PAVÉ SANS REDACTION ET AVEC METHODE EXTENSIONN	MÈTRE(M)	4	400.00	1600.0
14	DKD.KBA.KL.01.002	G-130	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	G41 p	PAVÉ SANS REDACTION ET AVEC METHODE EXTENSIONN	MÈTRE(M)	5	180.00	900.00
13	DKD.KBA.KL.01.002	G-113	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	ER1685 RR	MÈTRE(M)	1	426.91	426.91	
12	DKD.KBA.KL.01.002	G-112	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	ER1685 RR	MÈTRE(M)	1	426.91	426.91	
11	DKD.KBA.KL.01.002	G-111	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	ER1685 RR	MÈTRE(M)	2	410.44	820.88	
10	DKD.KBA.KL.01.002	G-110	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	ER1685 RR	MÈTRE(M)	2	410.44	820.88	
9	DKD.KBA.KL.01.002	G-109	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	ER1685 RR	MÈTRE(M)	6	464.07	2784.42	
8	DKD.KBA.KL.01.002	G-108	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	ER1685 RR	MÈTRE(M)	32	412.50	13200.0	
7	DKD.KBA.KL.01.002	G-105*	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	ER1685 RR	MÈTRE(M)	2	632.81	1265.62	HOMMAGE DE LA FACE A
6	DKD.KBA.KL.01.002	G-105	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	ER1685 RR	MÈTRE(M)	2	632.81	1265.62	
5	DKD.KBA.KL.01.002	G-104	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	ER1685 RR	MÈTRE(M)	6.1	562.50	3431.25	
4	DKD.KBA.KL.01.002	G-103*	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	ER1711 RR	MÈTRE(M)	2	577.50	1155.00	HOMMAGE DE LA FACE A
3	DKD.KBA.KL.01.002	G-103	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	ER1711 RR	MÈTRE(M)	138	577.50	79695.00	
2	DKD.KBA.KL.01.002	G-102	BRIQUES DE PAROI DE BASSIN	ER1711 RR	MÈTRE(M)	28	706.86	19792.08	
1	DKD.KBA.KL.01.002	G-101	BRIQUES D'ANGLE PAR LA PAROI DE BASSIN	ER1711 RT	MÈTRE(M)	2	511.50	1023.00	

PROJET | N°1 CHAINE DE PRODUCTION DU VERRE FLOTTANT DE LARBA D'ALGERIE

CLFG CO.,LTD.
ELIOYANG,CHINE

DESSINE PAR :		DATE :
VERIFIE PAR :		DATE :
EXAMINE PAR :		DATE :
VU PAR :		DATE :

PLAN DE RANGEMENT DES BRIQUES AUX PAROIS DU BASSIN

池壁砖排列图

SOUS-ARTICLE : FOUR DE FUSION DE VERRE DE FLOTTAGE 400t/J

Nº DE PLAN : 0501 - 4DBA - 41 - 10

ÉCHELLE : 1:50

FEUILLE : 1/1

Item	Désignation	Dimension	Quantité	Localisation	Date présumée d'utilisation
A- Briques réfractaires					
1	Briques de zircon –corindon électrofondues	500 x 100 x 70	500 briques	Paroi zone de fusion	2012
2	Briques de corindon blanc électrofondues	500 x 100 x 70	500 briques	Paroi zone de repos	2012
3	Briques d'étanchéité en quartz au zirconium	230 x 114 x 65	1000 briques	Chambres de régénération	2014
4	Briques d'étanchéité en zircon-corindon	230 x 114 x 65	1000 briques	Chambres de régénération, canal, gorge	2010
5	Briques d'étanchéité en silice	230 x 114 x 65	1000 briques	murs de séparation	2010
6	Briques d'étanchéité silico-alumineuses	230 x 114 x 65	1000 briques	Canal, gorge	2010
7	Briques d'étanchéité silico-alumineuses légères	230 x 114 x 65	1000 briques	Canal, gorge	2010
B- Mortiers et plaques					
1	Mortier de quartz au zirconium		2 tonnes		2010
2	Mortier au zirconium		2 tonnes		2010
3	Mortier réfractaire de silice		2 tonnes		2010
4	Plaques de fibres microcristales	1000 x 600 x 25	2000 unités		2014
5	Bouchons pour regards de contrôle	Suivant figure	400 unités		2010

ANNEXE N° 6: Briques réfractaires du four MFG

LA TIREE		500		510		520		530		540		550	
		limite inférieure +3%	limite supérieure +10%	limite inférieure +3%	limite supérieure +10%	limite inférieure +3%	limite supérieure +10%	limite inférieure +3%	limite supérieure +10%	limite inférieure +3%	limite supérieure +10%	limite inférieure +3%	limite supérieure +10%
Gaz m^3/j	2010	110 828	118 360	111 858	119 460	112 888	120 560	113 918	121 660	114 948	122 760	115 978	123 860
Débit spécifique KCal/Kg		**1 867**	**1 993**	**1 847**	**1 972**	**1 828**	**1 952**	**1 810**	**1 933**	**1 793**	**1 914**	**1 776**	**1 896**
Gaz m^3/j	2013	114 153	130 196	115 214	131 406	116 275	132 616	117 336	133 826	118 396	135 036	119 457	136 246
Débit spécifique KCal/Kg		**1 923**	**2 193**	**1 902**	**2 170**	**1 883**	**2 148**	**1 864**	**2 126**	**1 846**	**2 106**	**1 829**	**2 086**
Gaz m^3/j	2016	117 577	143 216	118 670	144 547	119 763	145 878	120 856	147 209	121 948	148 540	123 041	149 871
Débit spécifique KCal/Kg		**1 980**	**2 412**	**1 959**	**2 387**	**1 939**	**2 362**	**1 920**	**2 339**	**1 902**	**2 316**	**1 884**	**2 295**
Gaz m^3/j	2019	121 105	157 537	122 230	159 001	123 356	160 465	124 481	161 929	125 607	163 394	126 732	164 858
Débit spécifique KCal/Kg		**2 040**	**2 653**	**2 018**	**2 625**	**1 998**	**2 599**	**1 978**	**2 573**	**1 959**	**2 548**	**1 940**	**2 524**

LA TIREE		560		570		580		590		600	
		limite inférieure +3%	limite supérieure +10%	limite inférieure +3%	limite supérieure +10%	limite inférieure +3%	limite supérieure +10%	limite inférieure +3%	limite supérieure +10%	limite inférieure +3%	limite supérieure +10%
Gaz m^3/j	2010	117 008	124 960	118 038	126 060	119 068	127 160	120 098	128 260	121 128	129 360
Débit spécifique KCal/Kg		**1 760**	**1 879**	**1 744**	**1 862**	**1 729**	**1 846**	**1 714**	**1 831**	**1 700**	**1 816**
Gaz m^3/j	2013	120 518	137 456	121 579	138 666	122 640	139 876	123 701	141 086	124 762	142 296
Débit spécifique KCal/Kg		**1 812**	**2 067**	**1 796**	**2 049**	**1 781**	**2 031**	**1 766**	**2 014**	**1 751**	**1 997**
Gaz m^3/j	2016	124 134	151 202	125 227	152 533	126 319	153 864	127 412	155 195	128 505	156 526
Débit spécifique KCal/Kg		**1 867**	**2 274**	**1 850**	**2 253**	**1 834**	**2 234**	**1 819**	**2 215**	**1 804**	**2 197**
Gaz m^3/j	2019	127 858	166 322	128 983	167 786	130 109	169 250	131 234	170 714	132 360	172 178
Débit spécifique KCal/Kg		**1 923**	**2 501**	**1 906**	**2 479**	**1 889**	**2 457**	**1 873**	**2 437**	**1 858**	**2 417**

Annexe N°7 : calculs du débit spécifique et le débit du gaz