



SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

PREMIERE PARTIE : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LE VERRE

CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES

CHAPITRE III : LE RECYCLAGE DU VERRE

DEUXIEME PARTIE : ETUDES EXPERIMENTALES

CHAPITRE IV : MATIERES PREMIERES

CHAPITRE V : LES ETAPES DES TRAVAUX DE RECYCLAGE DU VERRE

TROISIEME PARTIE : ETUDES SOCIO-ECONOMIQUE DU PROJET

CHAPITRE VI: CONTEXTES DU PROJET

CHAPITRE VII : ETUDE FINANCIERE DE L'USINE

CHAPITRE VIII : ETUDE TECHNIQUE DE REALISATION

CHAPITRE IX : ETUDE ENVIRONNEMENTALE

CONCLUSION GENERALE



LISTE DES ABREVIATIONS

% : Pourcent

<: Inférieure

>: Supérieure

°C : Degré Celsius

A : Ampère

Ar : Ariary

cal: calorie

cm : Centimètre

cm² : Centimètre carré

cm³: Centimètre cube

CNRIT :Centre National des Recherches Industrielles et Technologiques

CUA :Commune Urbaine Antananarivo

ESPA : Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

FEVE :Fédération Européenne du verre emballage

g: Gramme

IR: infra rouge

kg: Kilogramme

kgf: Kilogramme force

km: Kilomètre

kW: Kilowatt

kWh: Kilowatt heure

m: Mètre

min: minute

s: seconde

SAMVA : Service Autonome de Maintenance de la Ville

sin : Sinus

t: tonne

UV: ultraviolet

W: Watt



λ : lambda

μm : micromètre



LISTE DES TABLEAUX

- Tableau N°1 :** Quelques exemples de colorant
- Tableau N°2 :** Données physiques du verre
- Tableau N°3 :** Résultat de l'analyse granulométrique du calcin.
- Tableau N°4 :** Composition chimique du calcin
- Tableau N°5 :** Résultat de l'analyse granulométrique du carbonate de sodium
- Tableau N°6 :** La composition chimique du carbonate de sodium
- Tableau N°7 :** Résultat de l'analyse granulométrique du borax
- Tableau N°8 :** Composition chimique du borax
- Tableau N°9 :** Pourcentage des constituants des échantillons
- Tableau N°10 :** Variation de température
- Tableau N°11 :** Résultat de la résistance à la compression
- Tableau N°12 :** Résultat de la résistance à la flexion
- Tableau N°13 :** Résultat de la dureté
- Tableau N°14 :** Composition chimique du verre pour le fondant -carbonate de sodium
- Tableau N°15 :** Composition chimique du verre pour le fondant- borax
- Tableau N°16 :** Importation du verre
- Tableau N°17 :** Evolution de la quantité d'importation d'emballage en verre à Madagascar (2002 à 2008 par kg et en indice)
- Tableau N°18 :** Répartition de l'importation d'emballage en verre à Madagascar selon les pays exportateurs en 2008
- Tableau N°19 :** La production mondiale de verre selon les types
- Tableau N°20 :** trois bâtiments nécessaires
- Tableau N°21 :** Coût de construction
- Tableau N°22 :** Coût des matériels et des camions
- Tableau N°23 :** Charge variable
- Tableau N°24 :** Charge du personnel
- Tableau N°25 :** Charge fixe



Tableau N°26 : Chiffre d'affaire annuel

Tableau N°27 : Marge sur cout variable – Seuil de rentabilité

Tableau N°28 : Tableau de rentabilité

Tableau N°29 : Rejets polluants d'un four verrier pour un four qui produit 230tonnes de verre et consomme 31 tonnes de fioul par jour

Tableau N°30 : Composition moyenne des fumées pour un verre

Tableau N°31 : Pollution des eaux générée par la fabrication de verre et industrie céramique



LISTE DES FIGURES

- Figure 1 :** Photo du verre soufflé
- Figure2 :** Schéma du four à pot
- Figure 3 :** Schéma du four à bassin
- Figure 4 :** Schéma montrant le procédé FOURCAULT
- Figure 5 :** Schéma montrant le procédé LIBBEY-OWENS
- Figure 6 :** Schéma montrant le procédé PITTSBURGH
- Figure 7 :** Fibre optique
- Figure 8 :** Schéma de principe de l'analyse thermique différentielle
- Figure 9 :** Etapes du recyclage du verre
- Figure10 :** Débris de verre
- Figure 11 :** Objets en verre
- Figure 12 :** Recyclage en boucle fermée
- Figure 13 :** Photo du *broyeur au CNRIT*
- Figure 14 :** Photo du tamis vibrant au laboratoire du Département Génie Chimique à Vontovorona
- Figure 15 :** Courbe granulométrique du calcin
- Figure 16 :** Courbe granulométrique du carbonate de sodium
- Figure 17 :** Courbe granulométrique du Borax
- Figure 18 :** Balance électronique au laboratoire du Département Génie Chimique à Vontovorona
- Figure19 :** Photo du four de marque « USUNI
- Figure 20 :** Echantillon dans le moule en argile



- Figure 21 :** Courbe de variation de température
- Figure 22 :** Photo de l'affichage numérique du four
- Figure 23 :** Schéma simplifié de l'éprouvette cylindrique
- Figure 24 :** Eprouvette cylindrique sollicitée à la compression
- Figure 25 :** Machine multifonctionnelle du type TESTWELL
- Figure 26 :** Evolution de la résistance à la compression en fonction de la teneur de stabilisant
- Figure 27 :** Schéma simplifié d'une éprouvette parallélépipédique
- Figure 28 :** Eprouvette parallélépipédique sollicitée à la flexion
- Figure 29 :** Evolution de la résistance à la flexion en fonction de la teneur de stabilisant
- Figure 30 :** Bouteilles obtenues après le recyclage du verre
- Figure 31 :** Taux de recyclage du verre en Europe en 2010
- Figure 32 :** Schéma des phases de production
- Figure 33 :** Débris de verre
- Figure 34 :** Calcin de couleur verte et incolore
- Figure 35 :** Mise en forme
- Figure 36 :** Nouveaux emballages en verre
-



LISTE DES ANNEXES

- ANNEXE 1 **DURETE DES MATERIAUX COURANTS
SELON L'ECHELLE DE MOHS**
- ANNEXE 2 **VARIATION DE LA VISCOSITE DES VERRES
AVEC LA TEMPERATURE**
- ANNEXE 3 **ANALYSE PHYSICO – CHIMIQUE**
- ANNEXE 4 **L'ANALYSE CHIMIQUE**



LEXIQUES

Affinage : élimination des éléments impurs

Boosting électrique : installation des électrodes dans le four qui permet d'assurer un chauffage au cœur de la pâte de verre et diminue l'émission polluants.

Déchet : tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance ; matériau, produit, ou plus généralement, tout meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon[1].

Fusion : passage de l'état solide à l'état liquide

Groisil ou « Calcin : Les déchets de verre broyés

Palettisation : empilement de marchandises sur une palette

Paraison : La goutte de verre en fusion

Récupération : le fait de s'acquérir des produits usagés. La destinée de la récupération est le réemploi.

Recyclage (" recycling " en anglais) est la séparation d'un déchet spécifique de la masse d'ordures et la transformation qui le rend utile à la confection d'autres produits, lesquels peuvent ou non ressembler au produit d'origine.

Réemploi (" reuse " en anglais) : l'utilisation d'une matière ou d'un produit à plusieurs reprises. Il concerne certains produits spécifiques comme les sacs plastiques du commerce réutilisés plusieurs fois par les ménages pour faire le marché familial.



INTRODUCTION GENERALE

Madagascar est longtemps apparu comme une île riche de promesses au large de l'Afrique. Malheureusement, elle est encore aujourd'hui dans un état de grande pauvreté. De plus, après la crise politique en 2009, le pays est actuellement confronté à des difficultés économiques sans précédent. Les entreprises disparaissent l'une après l'autre, le taux de chômage ne cesse d'augmenter, les prix des produits de première nécessité ont connu une hausse considérable.

Actuellement, la prise en compte de l'environnement constitue une politique indispensable de tous les pays qu'ils soient développés ou en voie de développement pour atteindre le développement durable.

La gestion des déchets est indispensable et peut contribuer à résoudre nos problèmes économiques et environnementaux. Ces déchets, y compris les emballages en verre, peuvent avoir des effets nocifs sur le sol, la flore et la faune. Ils contribuent à la dégradation des sites ou des paysages, à la pollution visuelle, et d'une façon générale à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement. Il est toutefois indispensable de les collecter, de les éliminer ou de les recycler selon les différentes sortes de déchets par l'application d'une politique de gestion des déchets. Ces déchets ont un impact très significatif et nuisible pour l'environnement. Pour cela, la gestion de l'environnement inclut naturellement la gestion des déchets et ne doit pas se séparer des politiques de lutte contre la pauvreté.

A Madagascar, le traitement des déchets n'est pas encore maîtrisé. C'est pourquoi, tous les déchets sont jetés à Andralanitra pour la capitale Antananarivo. Les déchets accumulés sont brûlés sans précaution devant le dégagement des fumées toxiques venant de ce lieu d'incinération. Les problèmes se posent donc sur l'emplacement de ce dépôt, sur l'absence de technologies utilisées pour faire brûler les ordures comme l'épuration des fumées dégagées (dépoussiérer, laver, neutraliser l'acide chlorhydrique et le gaz dégagé par la combustion des plastiques).



La solution à cette situation est le recyclage de divers déchets, y compris **le verre**. Il demeure un déchet sans futur à Madagascar pourtant il est très favorable économiquement à notre pays. C'est une source de matière première tirée des déchets

L'importation du verre sodo-calcique est favorisé grâce au commerce, en raison de 9000 t/an, cependant leur recyclage n'est pas vraiment envisagé ce qui reste un désavantage pour notre pays, car économiquement, l'exploitation de ces déchets rapportera des devises considérables. Et le recyclage de ces verres permet de réduire le volume des déchets, et donc de la pollution qu'ils causeraient.

Le principe est basé sur les dits « rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme » et chaque citoyen est déjà sensible à opter pour un changement de comportement en misant sur le concept des « 3R » (Réduction - Réuse - Recycle). C'est un concept misé sur une idée comme quoi l'homme doit dès à présent construire une société qui recycle les déchets à partir desquels les biens seraient utilisés avec parcimonie et réutilisés au lieu de les jeter.

Ce qui s'est inscrit dans la protection de l'environnement et du développement durable de notre pays, c'est la raison qui nous a poussés à contribuer à l'étude d'implantation d'une unité de recyclage *des emballages en verre*

Nous avons donc choisi le thème de ce mémoire : « **contribution à l'étude d'implantation d'une unité de recyclage des emballages en verre à Madagascar** »

Ce travail se divise en trois parties :

- La première partie est basée sur l'étude bibliographique
- La deuxième partie est consacrée à l'étude expérimentale
- La dernière partie est destinée à l'étude socio- économique du projet



PARTIE I :
ETUDES
BIBLIOGRAPHIQUES



CHAPITRE I : GENERALITE SUR LE VERRE

I.1.HISTORIQUE

1.1.1. La découverte

Les premiers verres fabriqués par l'Homme sont originaires de Mésopotamie, de Syrie ou d'Egypte. Ils ne sont pas encore transparents ou translucides mais opaques, de couleur verte ou bleue. La découverte du verre est attribuée à des marchands phéniciens aux environs de 400ans AvJC, Ils déposèrent leurs marmites sur des blocs de carbonate(calcaire). Sous l'action du feu ,ceux-ci fondirent et se mélangèrent au sable du rivage. Après le refroidissement ,ce mélange se transforma et sans le vouloir ,donna du verre.

Au même moment, on inventa le verre transparent à Sidon (Phénicie), probablement à cause de la pureté des sables de la région et de la présence de natron.

Au I^{er} siècle ap. JC. Cette découverte entraîne la naissance d'une forte industrie de verre creux. Grâce au soufflage à la canne, l'artisan est à bonne distance de la source de chaleur et il peut donner forme à des pièces de plusieurs dizaines de centimètres. Le verre incolore apparut alors et se répandit à partir du III^{ème} siècle, il est obtenu par adjonction de manganèse, qui joue le rôle de purificateur. La teinte naturelle du verre, bleu verdâtre, est due à la présence d'oxydes métalliques contenus dans le sable qui sert à sa fabrication.**[25]**

1.1.2 Le verre plat soufflé : V^{ème} et le X^{ème} siècle

Deux techniques sont apparues conjointement :

- Le soufflage en couronne : produit dans l'Ouest de la France et en Angleterre où sa production dura jusqu'au XIX^{ème} 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.

Figure 1 : photo du verre soufflé



- Le soufflage en manchon : produit dans l'Est et dans l'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.**[25]**

1.1.3. Le verre à vitre

Au début du XIV^{ème} siècle, naquit la première verrerie à vitre à Bézu-la-forêt dans l'Eure et les feuilles planes (« plats de verre ») inventées par Philippe Cacqueray.

1.1.4. A Madagascar

L'ambassadeur anglais ont offert des objets en verre pour Ranavalon III, à partir de cette époque, les ouvrages en verre commençaient à être connus.

Après la colonisation, le gouvernement lançait des projets d'étude concernant l'installation d'une unité de verrerie à Madagascar pour le marché local. C'est ainsi que la société verrerie de Madagascar était créée le 24 Aout 1967 à Toamasina. Mais la suite à des difficultés et surtout la manque de devise, l'usine



fermait ses portes en Aout 1984 et l'autorisation de mis en chômage technique des personnels fut obtenu le 30 Novembre 1986. [15]

I.2.FABRICATION DU VERRE

I.2.1. Matériaux pour la fabrication du verre

Les matériaux utilisés pour la fabrication du verre sont dans l'ordre d'importance :

-**La silice 60% à 72%** :c'est un corps vitrifiant introduit sous forme de sable dont la température de fusion se situe aux environs de 1800°

-**La soude 0,3% à 17%** :c'est un fondant qui a pour but d'abaisser la température de fusion

-**La chaux 0,3à 0,7%** : c'est un stabilisateur donnant au verre sa résistance chimique

-**Le magnésium 0% à 13,8 %** a le pouvoir d'améliorer les propriétés chimiques notamment la résistance aux agents atmosphériques

- **L'alumine 0% à 0,2%**a le pouvoir améliorer l'analyse chimique

-**Le sulfate 0 à 8,6%** c'est un agent de purification de la masse

- **Le charbon 0 à 3,6%** c'est un agent neutralisant[23]

I.2.2. Différents types de fours

I.2.2.1. Les fours à pots :

Ils sont utilisés pour les procédés de fabrication manuels (soufflage, coulage).

La production se fait à l'unité. Le verrier vient y cueillir la paraison puis travaille seule ou en équipe

Description:

Les premiers fours furent construits en terre pendant l'antiquité. Aujourd'hui, ils peuvent contenir de 1 à 16 pots contenant jusqu'à 1000 litres de verre en fusion chacun. Des ouvreaux de chargement permettent l'accès au creuset et à la matière.

Fonctionnement:

On dispose dans un four circulaire ou rectangulaire un certain nombre de récipients en argile réfractaire appelés pots ou creuset que l'on remplit de mélange vitrifiable. Les pots ne resteront en fonction que quelques semaines (pas plus de 25 potées) puis sont changés sans arrêter le feu.

Combustible

Les premiers fours jusqu'à l'époque moderne étaient alimentés en bois. De nos jours, les fours à pots sont alimentés par du gaz ou du fuel.

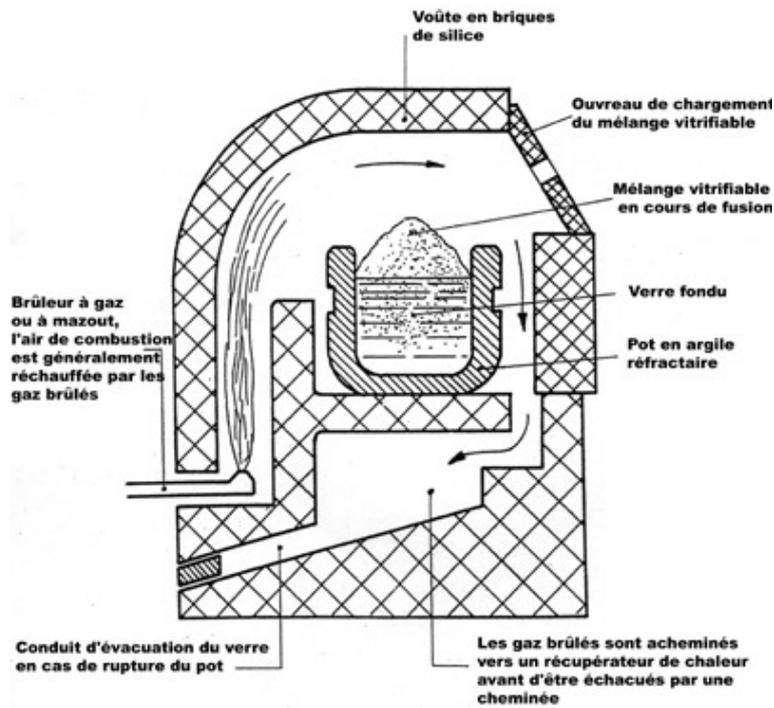


Figure 2: Schéma du four à pot



On dispose dans un four circulaire ou rectangulaire un certain nombre de récipient en argile réfractaire appelés pots ou creuset que l'on remplit de mélange vitrifiable[26]

1.2.2.2. Les fours à bassin:

Description:

Constitués de matériaux réfractaires, ces fours sont formés d'un long couloir rectangulaire pouvant mesurer jusqu'à 50m de long et 10m de large divisé par un ou deux compartiments. La cuve peut contenir jusqu'à 2500 tonnes de verre sur 1,50m d'épaisseur. Ils permettent des campagnes de travail de 3 à 5 ans, en produisant jusqu'à 600 tonnes de verre formé par jour. La durée d'activité des fours à bassin a été nettement améliorée depuis les Les matériaux constituant le four évoluent dans un milieu très corrosif car le verre fondu, par sa haute température et son rayonnement, est très oxydant. On distingue deux sortes de four à bassin suivant la production : pour du verre plat (étiré ou laminé) ou pour du verre creux.

Fonctionnement:

Les matières premières passent par une trémie d'enfournement à une des extrémités. Le niveau de la matière en fusion est maintenu constamment par ajout automatique des composants de base. La masse vitreuse progresse le long du couloir en passant par les différents stades de la fabrication. Le four est chauffé au niveau des zones de fusion et d'affinage. La matière est distribuée à la sortie dans des espaces de conditionnement (canaux distributeurs) qui alimentent les machines de façonnage, étirage, laminage).

combustibles:

Les combustibles sont le fuel ou le gaz naturel. Certains fours sont électriques et l'énergie est diffusée directement dans le verre en fusion qui est conducteur de chaleur à partir de 250°C. La fusion d'un kg de verre nécessitait d'abord 2,5 kg de bois, puis 1 kg de charbon de terre, puis 0,2 kg de mazout, puis 1 kWh pour les fours électriques.[27]

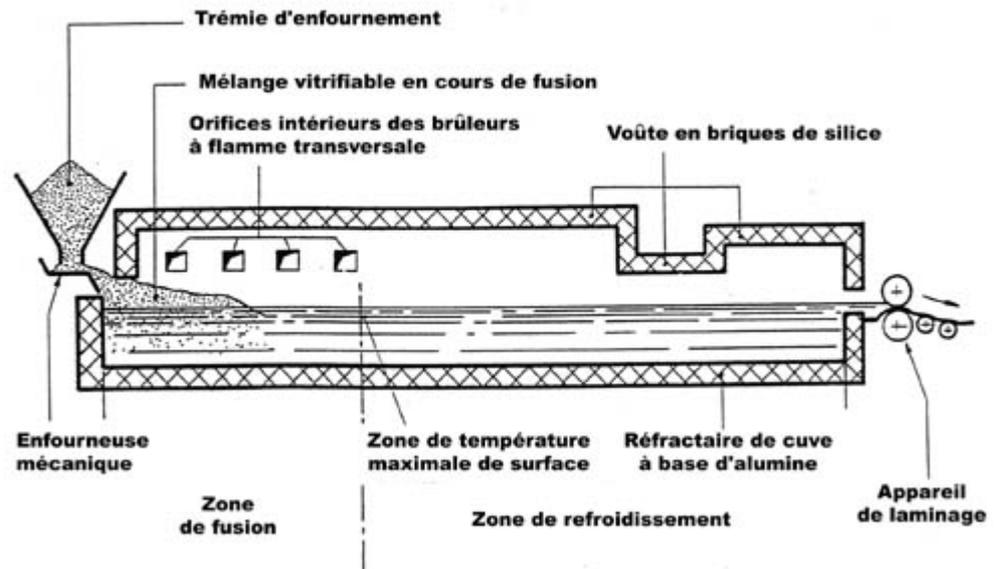


Figure 3: Schéma du four à bassin[23]

1.2.3. Procédés de fabrication[4]

1.2.3.1. Le procédé FOURCAULT(1932)

Ce procédé a été inventé en Belgique et consiste à faire passer le verre en fusion à travers une fente aménagée dans une pièce réfractaire ; la débiteuse se trouve légèrement en dessous de la surface en fusion .La nappe de verre est amorcée à l'aide d'une barre horizontale passant ensuite entre des rouleaux .La largeur de la feuille de verre est ainsi constante ,l'épaisseur peut varier de 1mm à 8mm ,la planéité est assez bonne mais la surface est légèrement marquée par les lèvres de la débiteuse .

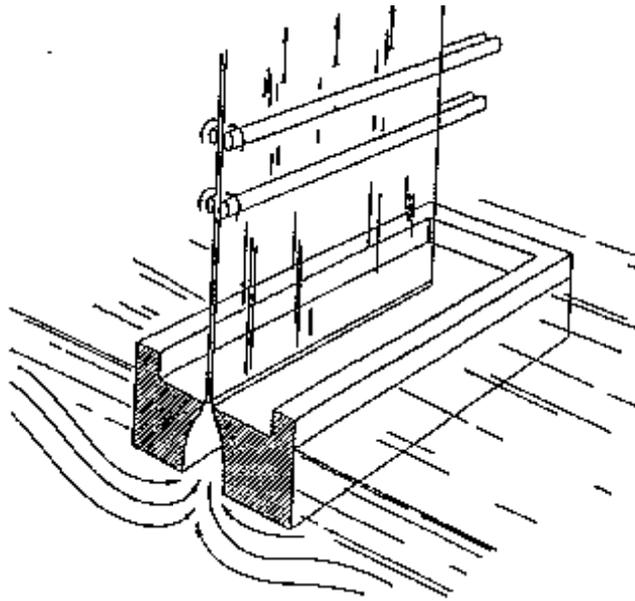


Figure 4: Schéma montrant le procédé FOURCAULT [23]

1.2.3.2. Le procédé LIBBEY-OWENS (1911)

Ce procédé fut mis au point définitivement aux Etats-Unis en 1918. Il consiste à faire passer le verre en fusion, entre deux rouleaux moletés placés aux deux extrémités de la largeur de la cuve, tournant en sens inverse, afin de maintenir une largeur constante de la feuille de verre.

La feuille de verre est alors pliée à 90° sur un rouleau placé à 1,50m à la verticale du bassin et ensuite amenée horizontalement à l'étenderie de recuisson. La surface interne du verre est plus ou moins marquée par le passage du rouleau.

rouleau plieur

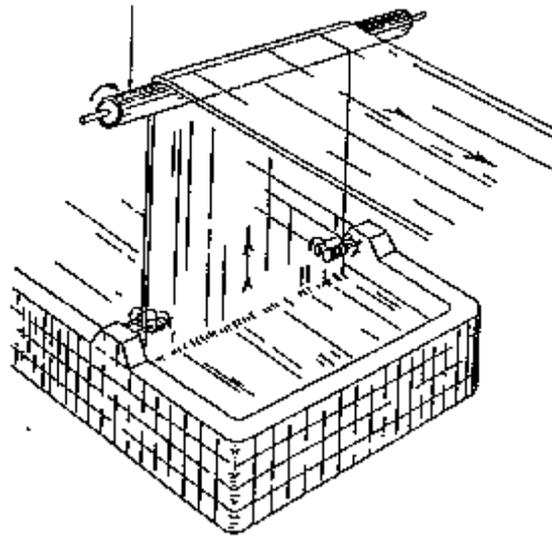


Figure 5: Schéma montrant le procédé LIBBEY-OWENS[23]

1.2. 3.3. Le procédé PITTSBURGH (1925)

Tout comme le procédé FOURCAULT et également mis au point aux Etats-Unis en 1925 ,il est à étirage vertical. La différence principale est que le verre passe à travers de la fente de la pièce de base sans toucher les bords.

A la sortie du bassin, le verre est refroidi rapidement par de forts courants d'air froid. Il est ainsi solidifié et ensuite recuit au passage d'une cheminée verticale.

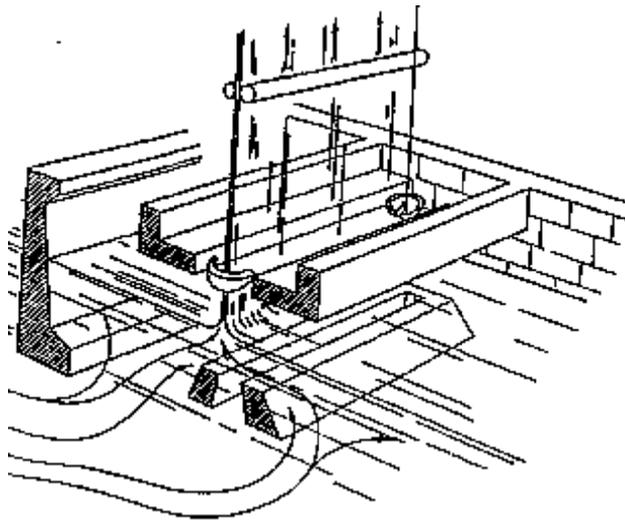


Figure 6: Schéma montrant le procédé PITTSBURGH[23]

I-3 TYPES DE VERRE

Selon leur composition chimique ou leur utilisation, on distingue plusieurs types de verre :

I.3.1. Les verres sodo-calciques

C'est un verre à base de soude, silice et chaux. Ce sont les plus courants (90 % de la production mondiale) pour tous les verres ordinaires, artisanaux ou mécaniques. Il est sensible aux chocs thermiques mais il a une bonne stabilité chimique. C'est le plus commun des verres. Il est utilisé pour la fabrication des verres plats et creux, des ampoules électriques, en bouteillerie et de verre spécial pour des applications particulières. Il est élaboré à partir d'oxydes de sodium Na_2O et de calcium CaO .

Voici un exemple de composition de verre sodo-calciques : Silice 72% + Soude 15 % + 10% Oxyde de calcium et les autres sont des oxydes colorants.[28]

I.3.2. Les verres boro-silicates

C'est un verre composé de silice et bore ou Alumino-silicates (silice et aluminium), ou verres de silice pure, coûteux à produire et réservés à des utilisations spéciales : des flacons ou des verres de laboratoire, télescopes, vaisselle adaptée à la cuisson.



Le pyrex est le plus connu (marque déposée par Corning Glass Works). Il s'agit d'un type de verre résistant aux changements rapides de température car son coefficient de dilatation thermique ($33.10^{-7} \text{ m}^3 / ^\circ\text{C}$ de 0 à 300°C) est faible. Il est fréquemment utilisé pour la vaisselle et la verrerie de laboratoire. Il sert aussi pour l'isolation et le stockage de déchets radioactifs et son température de ramollissement pour 80% de silice est de 820°C .

Voici un exemple de composition de verre borosilicate : Silice 80% + Soude 5 % + 15% Oxyde de bore. **[28]**

1.3.3. Les verres au plomb

On l'appelle « *cristal* » si la teneur en oxyde de plomb est supérieure à 24%. Il est utilisé pour la fabrication de gobeletterie et de verrerie d'art pour les téléviseurs et en électronique. Le cristal est limpide, très sonore, très résistant à la dévitrification. Son coefficient de dilatation est très élevé : $90.10^{-7} \text{ m}^3 / ^\circ\text{C}$ (de 0 à 300°C) et son température de ramollissement pour 60% de silice et 25% de plomb est de 630°C . On donne un exemple de composition : Silice 62% + Oxyde de plomb 21% + Potasse 7%. **[28]**

1.3.4. Le verre de silice

Il contient au moins 96% de silice. Il est très employé grâce à sa grande pureté et pour sa résistance aux températures élevées, à la corrosion et aux chocs thermiques. On l'utilise pour la fabrication de tubes de lampe à halogène, des éléments d'optique et des miroirs de télescope.

Son coefficient de dilatation est très faible : $5,6.10^{-7} \text{ m}^3 / ^\circ\text{C}$ (de 0 à 300°C) et son température de ramollissement pour plus de 96% de silice est de 1700°C . **[28]**

1.3.5. Les fibres de verre

On peut obtenir des fibres de verre qui peuvent être tissées ou feutrées, comme les fibres textiles (tissus ininflammables, fibres de renforcement dans les matières plastiques utilisées pour le renforcement des pneus de voiture,...)

Pour cela, on étire le verre fondu jusqu'à ce qu'il présente un diamètre compris entre 0,5 et $15 \mu\text{m}$ (15 millièmes de mètre). 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. Elles sont utilisées pour l'isolation des bâtiments, les pare-brises des automobiles et les vitres blindées. **[16]**

I.3.6. Les fibres optiques

Les fibres optiques (Figure N°7) sont fabriquées au départ d'un tube en verre (Préforme) possédant les propriétés géométriques et optiques qui devront être celles de la fibre optique in fine. Cette préforme est suspendue à plusieurs mètres de haut. Un four, chauffé à plus ou moins 2000°C permet la formation d'une goutte (l'amorce) à l'extrémité de la préforme. L'amorce est ensuite étirée et forme la fibre optique. Une fois refroidie, une résine synthétique et colorée est appliquée sur la fibre. Au départ d'une préforme de 6 à 7 cm de diamètre et d'1 mètre de long, il est possible d'obtenir plus de 300 km de fibres optiques ayant une épaisseur de quelques centaines de microns. Facilement manipulable et presque incassable, la fibre est enroulée autour de bobines. Les fibres optiques permettent de véhiculer des débits élevés d'informations (images, sons...) en convertissant des signaux électriques en signaux lumineux. **[16]**

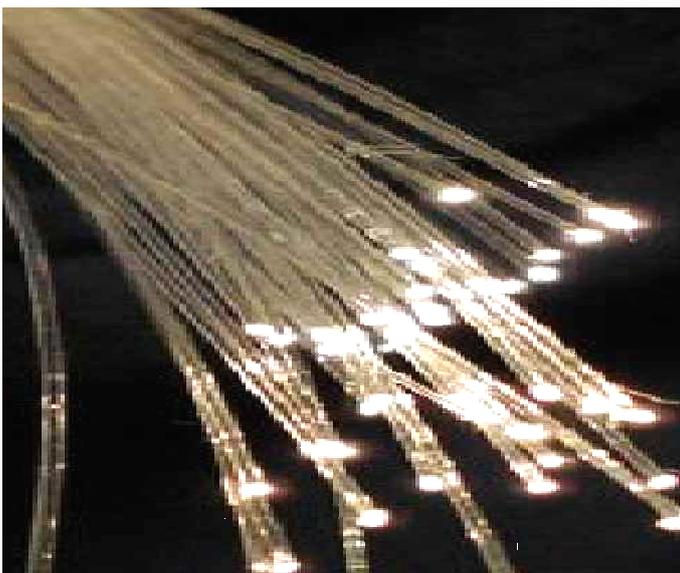


Figure 7: Fibre optique **[16]**



On peut regrouper les verres inorganiques sous différentes classes

- verres sodocalciques ;
- verres au plomb ;
- verres borosilicatés ;
- verres oxyazotés ;
- verres d'aluminosilicates ;
- verres de fluorures ;
- verres de phosphates ;
- verres métalliques.

I.4. COMPOSITION DU VERRE

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

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

I.4.1. Les oxydes formateurs (les vitrifiants)

La silice : (dioxyde de silicium SiO_2)

C'est le composant principal du verre qui représente environ 70% de la masse. Elle est l'élément formateur de réseau. Si l'on augmente sa quantité, on augmente la dureté du verre. Son point de fusion est à 1730°C. Elle entre dans la fabrication sous forme de sable dont les plus purs en contiennent 99,5 % (les sables quartzeux). Le sable de Fontainebleau, du fait de sa qualité, est très recherché pour la fabrication de verres d'optique et de cristal. Plus le pourcentage de silice est élevé et plus le coefficient de dilatation est faible ; donc, plus le verre est



résistant.

L'anhydride borique : (le bore ou borax anhydre B_2O_3)

Il diminue le coefficient de dilatation et améliore la résistance aux chocs thermiques ; il est aussi plus résistant à l'eau. Son point de fusion est à $2300^\circ C$. Il sert pour le travail de laboratoire (verre thermorésistant comme le Pyrex). Il possède aussi les propriétés d'un fondant.

L'anhydride phosphorique : (le phosphore P_2O_5)

Employé dans le domaine de l'optique. La principale source au Moyen Age est les cendres de bois. **[28]**

I.4. 2. Les oxydes modificateurs

I.4.2.1. Les fondants : (oxydes alcalins)

La silice permet d'obtenir un verre, mais son point de fusion est très élevé ($1730^\circ C$). En ajoutant des fondants, on abaisse cette température à $1400^\circ C$ (économie d'énergie) et on facilite les possibilités de travail. Les fondants sodiques et potassiques ont été utilisés conjointement dès le moyen âge.

L'oxyde de sodium (la soude Na_2O) : Il entrait autrefois dans la composition sous forme de cendres de plantes marines (ex : la salicorne)

- ou de nitre (grec = nitron). Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et sa résistance aux agents atmosphériques ainsi que le coefficient de dilatation. Il est plus utilisé pour le verre industriel que pour le verre soufflé car il doit être constamment réchauffé lors du façonnage.
- L'oxyde de potassium (K_2O) : Il entrait autrefois dans la composition sous forme de cendres de plantes terrestres comme la fougère ; aujourd'hui, on utilise du salpêtre (nitrate de potassium KNO_3). Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et le rend doux à la taille, mais il diminue sa résistance chimique. Il avantage le soufflage du verre car il augmente le temps de travail lors du façonnage.
- L'oxyde de magnésium (MgO) : Il est utilisé sous forme de dolomite (calcium+magnésium). Il n'est pas indispensable pour tous les verres, sauf



le verre flotté, le verre à vitre et en gobeletterie. Il abaisse la température de fusion et augmente la résistance aux agents chimiques. [28]

I.4.2.2. Les stabilisants : (oxydes alcalino-terreux)

L'introduction d'un oxyde alcalin (fondant) a provoqué la rupture d'une liaison Si - O et l'apparition d'un oxygène "non pontant". Ceci a pour effet de fragiliser le réseau et d'augmenter la solubilité à l'eau.

L'oxyde de calcium (CaO) : se trouve sous forme de chaux (qui est le stabilisant le plus employé) ou de dolomie (lorsque le verre doit contenir de la magnésie). Il augmente la résistance chimique du verre, son éclat et diminue sa solubilité, mais en excès il provoque une dévitrification. Il était utilisé au moyen âge pour les verres sodiques.

- L'oxyde de zinc (ZnO) : Il augmente l'éclat et l'élasticité.
- L'oxyde de fer (Fe₂O₃) : (c'est un stabilisant et un colorant) souvent contenu dans les roches naturelles, il donne une teinte verdâtre. Il faut donc procéder à une décoloration de cette teinte. Pour cela, on peut ajouter du bioxyde de manganèse (MnO₂) (savon des verriers).
- L'oxyde de plomb (PbO) : entre dans la composition du crystal. Il abaisse également le point de fusion en stabilisant la composition. Il rend le verre plus éclatant tout en lui conférant une légère teinte jaunâtre, il est plus agréable à couper et à travailler.

I.4.2.3. Les colorants:

Des oxydes métalliques pendant la fusion. Ils entrent en très faible proportion du mélange (ex : oxyde de cuivre pour du vert).

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

La coloration directe :

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



dépendent de la nature et de la quantité des colorants ainsi que de la composition du verre lui-même (sodique ou potassique).

La coloration indirecte :

Certains oxydes sont en suspension dans la masse vitreuse au cours de la fusion. La coloration apparaît lors du réchauffement du verre aux alentours de 600°C. La chaleur provoque une dilatation des particules qui met en évidence la couleur dans la longueur d'onde souhaitée.

Ex : rose et rouge à l'or ; jaune orangé à rouge sélénium.

Les matières utilisées :Elles sont très nombreuses et variées. Ce sont des colorants minéraux à base métallique car ce sont les seuls qui peuvent être mélangés à la silice pendant la fusion.[28]

Tableau N°1 : Quelques exemples de colorant

Couleurs	Colorants utilisés
Bleu	oxyde de cobalt, de manganèse
Jaune	Chrome, argent
Rouge	Oxyde de cuivre
Violet	Oxyde de manganèse
Rose et rouge rubis	Or
Jaune orangé à rouge	sélénium

I.4.2.4.Décolorants[28]

Les composants contiennent toujours un faible pourcentage d'oxydes métalliques qui teintent le verre d'une couleur verdâtre. Pour obtenir un verre réellement incolore, il faut donc procéder à sa décoloration. Il existe deux techniques :

a) La décoloration chimique

Les principaux décolorants sont le bioxyde de manganèse, appelé savon des verriers, les oxydes de titane et d'antimoine. On ajoute ceux-ci à la composition du mélange vitreux. Ils neutralisent la coloration verdâtre donnée par l'oxyde de fer.



Les conditions de fusion permettent ensuite de faire disparaître les oxydes métalliques indésirables en les décomposant.

b) La décoloration physique

Lors de la fusion, il faut introduire dans la composition du verre la couleur complémentaire à l'oxyde métallique déjà présent pour faire tendre la teinte de la masse vitreuse vers le gris (incolore)

Exemple : verdâtre + rose sélénium = neutre

I.5. PROPRIETES PHYSIQUES DU VERRE

Le verre, en qualité d'élément transparent étant le résultat de fusion de plusieurs matériaux, a des propriétés bien définies.

Tableau N°2 :Données physiques du verre

PROPRIETES	VALEURS
-poids spécifique	2500 kg/m ³ ou 2,5kg/m ² /mm
-élasticité	7000 N/mm ²
-Résistance à la compression	1000 N/mm ²
-Résistance à la traction	: 50 N/mm ²
-Résistance à la flexion :	30 N/mm ²
-Coefficient poisson	0,22
-Coefficient de rallongement	: 0,0085 mm/m °C
Résistance au flux thermique	env . 100°C
Résistance au choc thermique	+ou- 60°C
Dureté : (éch .de Mohs)	6,5



Chaleur spécifique	0,22Watt/m ² K
-Conductivité thermique	1,15watt/m ² K
Résistance au passage thermique	100°C
Température de ramollissement	545°C
Température de fusion	1200°C

Source :**[23]**

Ce sont des propriétés physiques qui conduisent à l'utilisation du verre dans les différents domaines :**[30][31]**

- La transparence : mais il peut être opaque ou opalescent.
- La densité : elle dépend des composants ; elle est d'environ 2,5. Cela signifie qu'un mètre cube pèse environ deux tonnes et demie ou qu'une feuille d'un mètre carré et d'un millimètre d'épaisseur pèse 2,5 kg.
- La résistance et l'élasticité : la cassure du verre est liée à sa flexion et à sa résistance au choc. Il casse là où le métal se tord. Contrairement, sa résistance à la compression est importante : il faut une pression de 10 tonnes pour briser un centimètre cube de verre.
- L'imputrescibilité : il ne se putréfie pas.
- L'imperméabilité : elle est extrêmement grande mais le verre reste poreux pour certains liquides comme le kérosène ; on dit « qu'il sue ».

- La dilatation : c'est un très mauvais conducteur de chaleur. Il se brise s'il subit un brusque changement de température car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas en même temps. Son coefficient de dilatation est faible, ce qui lui confère de nombreuses applications : il sert d'isolant thermique (laine de verre). On retrouve presque les mêmes coefficients que certains métaux d'où l'exécution de soudures verre-métal. Ce coefficient varie selon la composition.
- La conductivité : il est mauvais conducteur (environ 500 fois moins que le cuivre); on l'utilise comme isolant électrique. C'est aussi un bon isolant acoustique suivant



l'épaisseur de la feuille. Ceci n'est pas le cas à chaud car il devient conducteur à partir de 250°C.

- Il est ininflammable et incombustible.[42]

I-6 PROPRIETES CHIMIQUES DU VERRE

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

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

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

- L'action des acides : ils décomposent la silice, le plus rapide est l'acide fluorhydrique qui permet de graver en profondeur le verre plaqué. Le verre peut donc être dissout



CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATIERESPREMIERES

II .1. ANALYSE CHIMIQUE

Elle permet de déterminer la teneur des principaux éléments présents dans la matière première que ce soit quantitative ou qualitative ou structurale d'où ces trois analyses sont :Analyse chimique quantitative, Analyse chimique qualitative, Analyse de structure

II.1.1. Principe

Toutes les analyses chimiques élémentaires ont été réalisées par spectroscopie d'émission atomique à l'aide d'un dispositif ICP-AES (Induced Coupled Plasma). Un aérosol contenant l'échantillon dissout passe dans un plasma haute fréquence constitué d'argon partiellement ionisé à une température élevée (4500 à 6000 K). Des électrons des atomes présents dans l'aérosol sont excités par le plasma. Les longueurs d'onde du rayonnement émis au cours du retour à l'état fondamental sont caractéristiques des éléments présents. L'intensité de l'émission observée pour chaque longueur d'onde est directement proportionnelle à la quantité d'atomes de l'espèce impliquée. Un photomultiplicateur placé dans le champ, traduit l'intensité lumineuse observée pour chaque longueur d'onde en un courant électrique d'intensité proportionnelle à la concentration en élément dosé. L'intensité, I , de chaque raie varie avec la concentration, C , de l'élément dans le plasma.

Les mesures sont effectuées avec des solutions diluées pour lesquelles la concentration en espèces à doser est inférieure à 1 g/l.

II.1.2. Mise en solution des solides

L'analyse chimique des solides requière au préalable leur mise en solution. Une masse de 20 mg d'échantillon finement broyé, préalablement séché à 110°C pendant 24 heures, a été pesée puis introduite dans un tube en téflon. Des volumes de 3 ml de HF (28%), 3 ml de HCl et de 1 ml de HNO₃ (68%) ont été ensuite introduits dans le réacteur. La dissolution a été réalisée au cours d'une montée (20 minutes) en température ($T_{max} = 180^{\circ}C$) et en pression (pression



maximale atteinte = 30 bars) suivi d'un palier de 20 minutes à l'aide d'un microonde.

II.1.3. Dilution des filtrats

Le filtrat obtenu après réaction chimique en un temps t donné est dilué afin d'obtenir des solutions de concentration dans le domaine étalonné (0 à 50 ppm). Les éléments dosés sont le silicium, sodium, potassium et calcium qui ont respectivement une énergie d'excitation de 2881, 5889, 7698 et 3179 eV. L'incertitude sur la mesure par ICP-AES donnée par l'appareil est estimée à 5%.

II .2. SPECTROSCOPIE RAMAN

La spectroscopie Raman est un moyen rapide et non destructif d'obtenir des informations sur la structure d'un matériau. Elle repose sur l'effet Raman qui résulte de l'interaction entre les photons d'une source lumineuse incidente et les modes de vibration des molécules de matériau. Lorsque cette onde monochromatique de fréquence N_o arrive sur le matériau ,elle donne naissance à deux types d'ondes diffusées :

- Une onde diffusée élastiquement c'est-à-dire à la même fréquence N_o que l'onde incidente
Cette diffusion appelée diffusion Rayleigh est de très loin la plus probable.
- Des ondes diffusées inélastiquement qui sont :
 - L'onde Stokes de fréquence $N_o - N_{vib}$ ce décalage résulte du transfert d'énergie du photon incident vers la molécule
 - L'onde anti-stokes de fréquence $N_o + N_{vib}$ ce décalage résulte du transfert d'énergie inverse du précédent.**[15]**



II.3. SPECTROSCOPIE D'ABSORPTION DES RAYON X

La spectroscopie d'absorption des rayons X est relativement récente puisqu'elle dépend fortement du développement des sources de rayons X et plus particulièrement de celui du rayonnement synchrotron. Cette technique est pourtant de nos jours largement utilisée pour les études structurales locales. Elle présente l'avantage d'être adaptée à l'étude de matériaux amorphes sur lesquels les expériences de diffraction sont impuissantes ; Ce sont complémentaires de la spectroscopie Raman

- **Origine du signal EXAFS** (Extended X-ray Absorption Fine Structure)

Le signal EXAFS se déduit de la mesure du coefficient d'absorption des rayons X ,noté μ .Ce coefficient qui est fonction de l'énergie des rayons X incidents est celui qui intervient dans la loi de Beer-Lambert :

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

où x : épaisseur de l'échantillon

I_0 : l'intensité du faisceau incident

I : l'intensité du faisceau transmis après avoir traversé l'échantillon

La spectroscopie d'absorption des rayons X consiste donc à mesurer ce coefficient d'absorption μ en fonction de l'énergie du faisceau incident au voisinage du seuil d'absorption d'un élément sélectionné[15]

II.4.DIFRACTION DES RAYONS X

II.4.1. Principe :

Le rayon X est la radiation électromagnétique dont la longueur d'onde est courte



$$(0,1A^\circ < \lambda < 10A^\circ)$$

Les cristaux constituent des réseaux naturels dont les intervalles caractéristiques (intervalles entre plans réticulaires) sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde des rayons X. Par conséquent, ces derniers sont diffractés par les cristaux et les conditions de diffraction d'un rayonnement X par une famille de plans réticulaires sont définies par la loi de BRAGG :

$$2d_{hkl}\sin\Theta = n\lambda$$

n = nombre entier désignant l'ordre de la réflexion

λ = longueur d'onde du rayonnement

d_{hkl} = distance entre les plans réticulaires où h, k, l sont des indices de Miller

Θ = angle de réflexion

L'intensité des réflexions d'une même famille de plans réticulaires varie avec la constitution de la maille élémentaire et la nature des constituants du cristal. Chaque espèce cristalline donne un diagramme de diffraction dont la position et l'intensité correspondent à sa structure cristalline.

Selon les types de cristaux à étudier, on utilise les différentes méthodes suivantes :

-la méthode de DEBYE SCHERRER utilisée pour la plupart des composés cristallins

-la méthode des agrégats orientés spécifiques pour l'étude des argiles [15]



II.4.1.1. Méthode des poudres DEBYE SCHERRER

L'échantillon sous forme de poudre est coulé sur un mince fil de verre placé sur l'axe d'une chambre cylindrique sur la paroi de laquelle est appliquée une pellicule photographique. On fait tomber des rayons X monochromatiques en faisceau parallèle sur l'échantillon. Comme la poudre est constituée d'un grand nombre de cristaux se présentant dans toutes les directions, il se trouve que les plans réticulaires de certains d'entre eux font avec le rayon incident un angle satisfaisant la relation de BRAGG.

Ils donnent alors des rayons diffractés faisant l'angle 2θ avec le rayon incident et laissant sur la pellicule photographique des traces d'ovales concentriques [15]

II.4.1.2. Méthode des agrégats orientés.

Cette méthode est surtout utilisée pour l'analyse des argiles. Elle consiste en une préparation particulière de forme aplatie qui sédimentent à plat de leur suspension parfaitement floculée et dispersée. La suspension placée dans un récipient à fond plat est évaporée doucement) l'étuve à une quarantaine de degrés. Elle laisse une mince pellicule d'argile constituée de particules orientées selon leur plan de clivage 001,002,003 : la pellicule est utilisée à la place des bâtonnets cylindriques de la méthode de DEBYE SCERRER.

Des fragments de cette pellicule sont exposés aux rayons X perpendiculairement aux faisceaux. On la fait pivoter d'un angle petit suffisant à réaliser la relation de BRAGG. Les diagrammes se réduisent pratiquement à un nombre de réflexions des premiers ordres sur les plans de clivage. Ce phénomène se traduit par des petites accolades sur l'équateur du cercle. On obtient ainsi des spectres dont l'interprétation est beaucoup plus aisée, même pour des argiles dans la constitution desquelles entrent plusieurs minéraux argileux



II.4.2. Utilité :

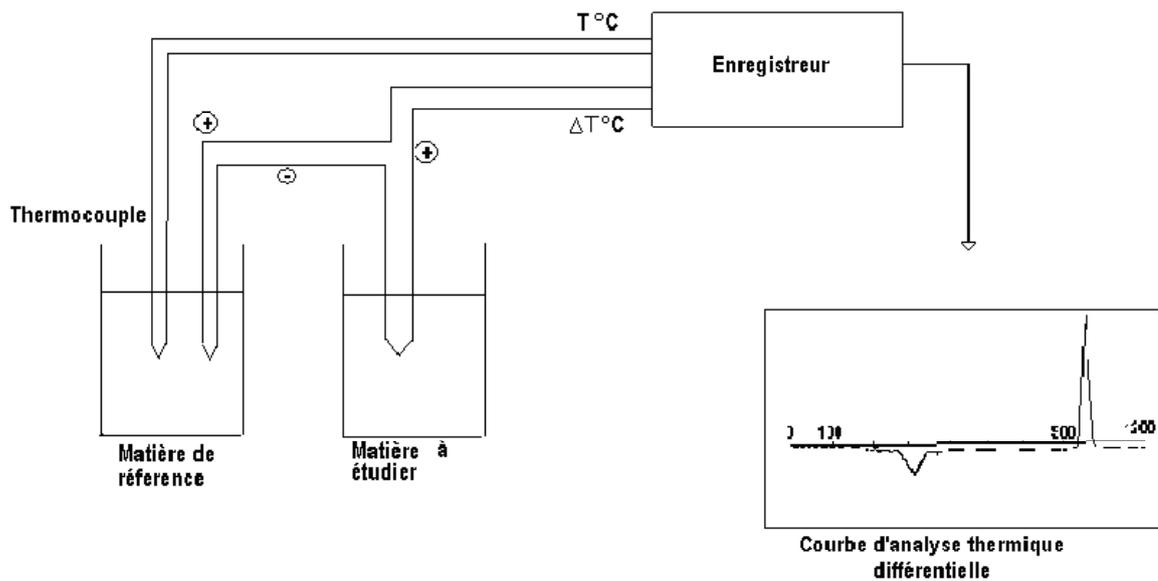
La méthode des agrégats orientés permet de déterminer les écarts réticulaires relatifs aux différentes directions de plans réticulaires .Elle aide aussi à l'identification importante pour l'étude des argiles.[15]

II.5. ANALYSE THERMIQUE DIFFERENTIELLE(ATD)

II.5.1. Principe

L'analyse thermique différentielle consiste à enregistrer les variations de température résultant de la transformation endothermique ou exothermique .Pour ce faire ,on soumet l'échantillon à étudier à une température croissante et le corps neutre de référence .Par la suite ;on mesure à l'aide de deux thermocouples montés en opposition la différence de température Δt entre les deux corps :l'une des soudures plongeant dans les matériaux de référence ,l'autre dans l'échantillon à étudier .Un troisième thermocouple placé dans les matériaux de référence servira à repérer la température du système.

La courbe obtenue sur l'enregistrement présentera des pics ou des bosses correspondant à des phénomènes endothermiques ou exothermiques dus à des pertes d'eau,à des décompositions ou des changements d'état cristallin. Elle donne des renseignements sur les différentes variétés cristallines présentes dans les échantillons.



Source : MURAT, 1972

Figure 8: Schéma de principe de l'analyse thermique différentielle

II.5.2. Utilité

Cette analyse met en évidence les différentes transformations physiques ou chimiques ayant lieu au sein de la matière lorsqu'elle subit un chauffage, comme la décomposition des hydrates, le départ d'eau de constitution des minéraux argileux, la décomposition des carbonates, les transformations allotropiques. Elle donne des renseignements sur les différentes variétés cristallines présentes dans l'échantillon ; Elle contribue essentiellement à l'identification des matières premières.

II.6. GRANULOMETRIE

II.6.1. Principe

Pour une fraction supérieure à $40\mu\text{m}$, le principe consiste à donner la masse de matière retenue sur des tamis de dimension de mailles décroissante tandis que pour une fraction inférieure à $40\mu\text{m}$, il s'agit de mesurer la densité moyenne d'une tranche de suspension poly dispersée à des temps définis.



II.6.2. Utilité :

La granulométrie est une importance capitale en céramique car elle contribue à conditionner :

- La plasticité des matières premières et des pâtes argileuses
- L'élaboration de décomposition de compacité déterminée
- Le frittage des matériaux
- La texture finale des produits **[15]**

II.7. DILATATION

II.7.1. Principe :

Le principe de dilatation détermine les variations dimensionnelles d'une éprouvette soumise à une élévation progressive de température.

II.7.2. Utilité :

Elle met en évidence les variations dimensionnelles, les transformations allotropiques, les espèces minérales. C'est un des moyens d'identification des matières premières.

En outre, l'étude dilatométrique des produits crus intervient lors de la détermination du profit thermique des fours. Elle permet également le contrôle du degré de cuisson des produits finis et entre dans l'estimation du comportement en service des matériaux soumis à des sollicitations thermiques. **[15]**

II.8 MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE

II.8.1. Principe :

D'une manière générale, elle se rapporte à la détermination de la masse et du volume réel ou volume absolu d'une matière sèche. C'est-à-dire on exclut les pores et les cavités.

$$\rho_{ab} = \frac{M}{V_{ab}}$$



II.8.2. Utilité :

Elle concourt à l'identification des matières premières. Son intervention est nécessaire au cours du calcul des compositions de pâtes et de barbotines. Elle entre dans le calcul de la porosité fermée et totale des matériaux et renseigne sur le degré de cuisson des produits.

II.9. MASSE VOLUMIQUE APPARENTE

II.9.1. Principe :

La masse volumique apparente détermine la masse ainsi que le volume apparent de l'échantillon. Le volume apparent c'est le volume naturel de l'échantillon après séchage.

$$\rho_{ap} = \frac{M}{V_{ap}}$$

II.9.2. Utilité

D'une part, elle contribue à l'identification des matières premières. Elle permet d'estimer la compacité de celles – ci avant cuisson. D'autre part, elle entre dans le calcul de la porosité totale des matériaux et renseigne aussi sur les degrés de cuisson.

II.10. RETRAIT AU SECHAGE

II.10.1. Principe

Le retrait de séchage mesure les variations dimensionnelles d'une éprouvette en fonction des variations d'humidité de celle – ci.

II.10.2. Utilité

Cet essai met en relief les différentes phases du séchage : départ de l'eau libre (colloïdale) provoquant un retrait de l'éprouvette. C'est une phase intermédiaire pendant laquelle des vides commencent à se former, avec poursuite du retrait, et enfin, départ d'eau fortement liée (interposition), qui n'entraîne plus de retrait. La courbe de Bigot est un moyen d'estimation du comportement au séchage des matières et des pâtes de céramique.**[15]**



II.11. RETRAIT

II.11.1. Principe

Avec le retrait, l'on mesure des variations dimensionnelles d'une éprouvette ayant subi une cuisson.

II.11.2. Utilité

Cet essai permet, en particulier, de calculer les dimensions du moule à utiliser pour l'obtention de produits finis de côtes déterminées.

II.12. PLASTICITE

II.12.1. Principe

Elle mesure les efforts et les déformations subies par une éprouvette définie, soumise à une vitesse de déformation en torsion croissante.

II-12.2. Utilité

Elle permet de déterminer les contraintes maximales supportables (sans dommages) par une pâte en cours de façonnage ou de séchage. D'une façon générale, cet essai est utilisé pour la détermination des caractéristiques rhéologiques : paramètres prépondérants pour rechercher les conditions optimales de façonnage ou de séchage des pâtes céramiques.

II.13. CONDUCTIVITE THERMIQUE

II.13.1.Principe

Elle mesure le coefficient de conductivité thermique du matériau, noté C. Soient e l'épaisseur d'un mur du four en [m], une face de la brique est à la température T₁ en [°C], la face opposée est à la température T₀ en [°C] plus faible que T₁, Q la quantité de chaleur transmise en [Kcal], h la durée de transport de chaleur en [h], S la surface de transmission en [m²]. Le coefficient de conductivité thermique C que nous cherchons à obtenir est déduit par la formule :

$$C = \frac{Q \cdot e}{S(T_1 - T_0)h}$$

C [kcal/m h °C]



Q [kcal]

Il y a 2 méthodes pour calculer la quantité de chaleur transmise à travers une brique réfractaire :

II.13.1.1. Méthode statistique

Pour la méthode statistique on se sert d'un dispositif calorimétrique qui consiste à enregistrer le flux calorifique à travers l'échantillon opéré.

II.13.1.2. Méthode dynamique

Pour cette méthode, le dispositif demande un appareillage complexe. On prend 4 à 6 éprouvettes réfractaires taillées de forme parallélépipède qui a sensiblement la dimension d'une brique normale. L'essai demande que ces briques ne soient appliquées les unes sur les autres. On place une résistance électrique entre deux éprouvettes au centre. Au cours du chauffage la température atteinte est donnée par un couple thermoélectrique. La quantité de chaleur subie par les briques se détermine à l'aide d'un calorimètre ordinaire. Elle est toujours variable avec la température.

II.13.2. Utilité :

La méthode dynamique permet de calculer les échanges de chaleur dans les maçonneries des fours. Aussi est-il important de déterminer la conductivité des réfractaires. Ces valeurs sont indispensables pour qualifier les quantités des briques isolantes. Des écarts de 20 à 25% sont admis pour la valeur de coefficient de conductivité thermique tant que l'opération se fait dans les meilleures conditions possibles.

II.14. RESISTANCE A LA COMPRESSION

II.14.1. Principe :

La mesure de la résistance à la compression s'effectue par un appareil dont les caractéristiques sont données ci-dessous :

L'éprouvette est soumise à l'action d'une force verticale dont l'intensité est donnée par la lecture d'un cadran. La valeur correspondante à la rupture de l'éprouvette donne la résistance à la compression. Soit X le nombre de divisions indiquées sur le cadran.

Soit R la résistance à la compression. Par définition : la résistance R est égale :



$$R_c = \frac{F}{S}$$

R : Résistance à la compression [Kgf / cm²] ou [daN /mm²]

F : force exercée par le piston en Kgf ou daN avec, daN = 1,02 Kgf

S : Section du piston en cm².

X : la division correspondante.

II.14.2. Utilité :

Elle permet de déterminer l'endurance de l'éprouvette par une charge avant l'utilisation de la brique réfractaire.

CHAPITRE III: LE RECYCLAGE DU VERRE

III.1. HISTORIQUE

En 1974, les premières bouteilles de verre étaient collectées et recyclées en France, à l'initiative des verriers... Pourtant quelques précurseurs ont organisés et lancé le recyclage du verre. L'idée a plu. L'industrie verrière tout entière a investi, la dynamique s'est enclenchée, le Geste Verre était né ! Et il est vite devenu partie intégrante du quotidien de millions de Français. [30]

III.2 MATIERE PREMIERE : LE CALCIN

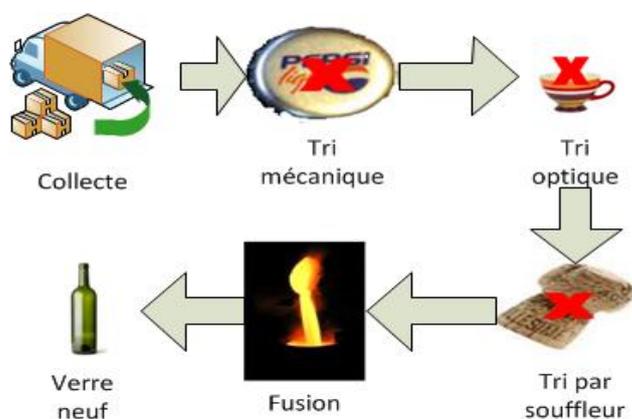
La matière première de base est le débris de verre appelé également calcin ou groisil.

III.3 DIFFERENTES ETAPES DU RECYCLAGE DU VERRE

Le verre est un matériau qui **se recycle à l'infini** : il suffit de trier et de broyer le verre collecté pour obtenir du "calcin", c'est-à-dire des débris de verre qui, ajoutés à du sable, de la soude et de la chaux, serviront à fabriquer de nouveaux emballages.

Chauffé à plus de 1500°C, le calcin peut prendre toutes les formes souhaitées et redevenir une bouteille ou un bocal en verre.

Figure 9: Etapes du recyclage du verre





Voici les différentes étapes du **recyclage du verre** :

-Tri des emballages par l'habitant qui dépose le verre dans des bacs et des conteneurs

- Collecte sélective pour transporter le verre vers un centre de traitement

-Au centre de traitement, différents tris manuels et automatiques sont effectués (élimination des objets indésirables et des impuretés, éventuellement tri par couleur...)

- Broyage du verre brut pour obtenir du calcin

- Fusion du calcin et fabrication de nouvelles bouteilles dans une usine de verrerie

Après ces étapes, il permet de remplir des nouvelles bouteilles dans un centre d'embouteillage et de remettre des bouteilles dans le circuit de distribution[32].

III.3.1. Le triage :

Le triage consiste à séparer les verres selon leurs couleurs et leurs types et à enlever les déchets

III.3.1.1. Triage par les consommateurs :

On lui demande de ne déposer dans les bacs ou les conteneurs que des emballages en verre. On lui demande aussi de ne pas y mélange les autres éléments par exemple ;des capsules, des morceaux de porcelaine, etc,...Ces produits ne fondent pas dans les fours.

Seuls les **emballages en verre** (de type bouteilles de vin ou de jus de fruit, pots de confiture et bocaux sans leur couvercle) doivent être déposés dans les conteneurs ou les bacs de collecte sélective prévus à cet effet. Il est nécessaire de séparer le verre coloré du verre transparent.



Figure 10: Débris de verre

En revanche, les ampoules électriques, les tubes néon, les miroirs ainsi que les verres de table et la vaisselle en verre ne sont pas recyclables. La porcelaine, la faïence et la céramique ne peuvent pas non plus être utilisées pour le recyclage du verre.

III.3.1.2. Triage au centre de traitement :

Une série de tri s'effectue dans le centre de traitement :

- Le verre collecté doit subir un premier tri manuel, puis plusieurs tris automatiques destinés à le débarrasser de ses impuretés.
- Des tris mécaniques éliminent les métaux ferreux ou non ferreux (acier,aluminium)
- Un tri optique au laser identifie et extrait les matériaux infusibles. Un tri optique (grâce à un rayon infrarouge) retire les éléments non transparents comme la céramique, qui n'est pas recyclable
- Un soufflage permet d'extraire les éléments légers :les bouchons, le papier
- Un tri complémentaire, démêlage pour séparer le verre de couleur du verre incolore



III.3.2. Le broyage:

Le débris du verre bien trié est ensuite broyé et transformé en calcin. Une tonne de verre permet de fabriquer 2138 nouvelles bouteilles de 75 cl.

III.3.3. l'enfournement

L'enfournement comporte trois phases :

C'est l'évolution du mélange vitrifiable pendant sa montée en température. Dans les fours à pots ; la fonte d'une potée de (500 à 1000 litres peut durer jusqu'à 12 heures) **[33]**

III.3.3.1. La fusion (800° à 1400°C)

Les matières premières se transforment en verre fondu en provoquant des dégagements gazeux (CO₂) et la formation des bulles. Les silicates alcalins (contenus dans la soude et la potasse) et les silicates de calcium (contenus dans la chaux) contiennent des impuretés à l'état naturel. Ces bulles seront éliminées lors de l'affinage.

III.3.3.2. L'affinage (1450° à 1530°C) :

Le chauffage est prolongé jusqu'à ce que le verre soit assez fluide. On ajoute un agent d'affinage (sulfate de sodium) au mélange visqueux pour faire grossir les bulles gazeuses. Elles peuvent alors remonter à la surface et disparaître ; La surface du verre en fusion est recouverte de déchets que l'on racle avec des outils en fer. La matière doit être homogène et ne doit plus présenter de bulles.

III.3.3.3. Le conditionnement thermique (1530°C à 1000°C) :

Figure 11: objets en verre



La température diminue et les dernières bulles remontent à la surface. Appelée « braise » au XVIIIème siècle, cette phase consiste à abaisser la température du mélange pour lui donner une viscosité adaptée au façonnage pour obtenir un nouveau objet.

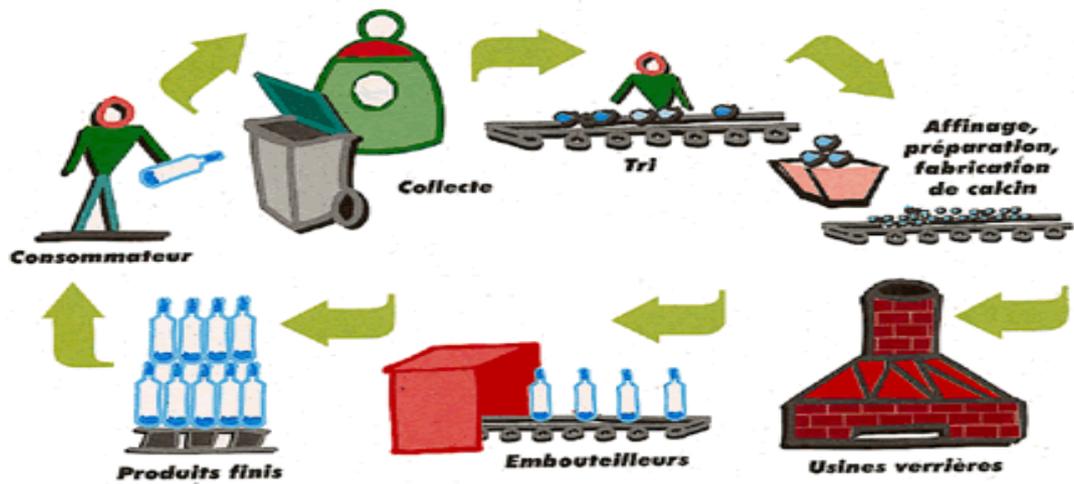
III.3.4. La fabrication de nouvelles bouteilles :

Plus le groisil est pur, plus il peut être utilisé pour la production de nouveaux verres. **Le verre d'emballage est recyclable à 100% et à l'infini.** Ainsi, une bouteille en verre redeviendra une bouteille en verre et 100% du verre collecté est recyclé.

Une tonne de verre permet de fabriquer 2138 nouvelles bouteilles de 75 cl ou 1426 bouteilles de 1L.

Voici le schéma simplifié montrant les étapes du recyclage des emballages en verre en boucle fermée

Figure 12: recyclage en boucle fermée





PARTIE II :
ETUDES
EXPERIMENTALES

CHAPITRE IV: MATIERE PREMIERE

Les débris de verre appelé **calcin** ou **groisil** est la matière première de base de notre recyclage. pour notre étude expérimentale, on va étudier le recyclage direct c'est-à-dire obtention du nouveau verre à partir de la refonte du calcin. On ajoute un fondant(carbonate de sodium ou borax) dans le calcin pour diminuer la température de fusion. On y met aussi un stabilisant(oxyde de plomb) pour rendre le verre plus stable

IV.1.la collecte et le triage des débris de verre :

Après avoir regroupé les échantillons de verre selon la couleur pour réaliser l'expérience de recyclage ;on va passer au lavage de la matière première pour enlever les impuretés comme le papier, la colle, l'huile et les autres mélanges inutiles..

IV.2. Le concassage et le broyage :

Pour avoir des poudres de verre de petites dimensions, on utilise le broyeur du CNRIT. Avant l'utilisation du broyeur ;il faut réduire manuellement en petits morceaux les débris de verre en utilisant un marteau .

Figure13 :*Photo du broyeur au CNRIT*



IV.3. Le tamisage

Le tamisage consiste à séparer le calcin selon la taille des grains de verre, L'opération de tamisage conduit à l'analyse granulométrique

Figure 14: photo du tamis vibrant au laboratoire du Département Génie Chimique à Vontovorona



Tableau N°3: Résultat de l'analyse granulométrique du calcin.

Rang tamis	Tamis [μm]	Diamètre moyen des	Refus partiel[g]	Pourcentage de refus %	Passé cumulé %
------------	-------------------------	--------------------	------------------	------------------------	----------------



		particules			
1	1000	-	0	-	100,0
2	500	750,0	21	7,0	93,0
3	250	375,0	44	14,7	78,3
4	125	187,5	93	31,0	47,3
5	100	112,5	14	4,6	42,6
6	71	85,5	111	37,0	9,0
7	50	60,5	17	5,6	0,0
8	-	-	-	-	

Source :Auteur

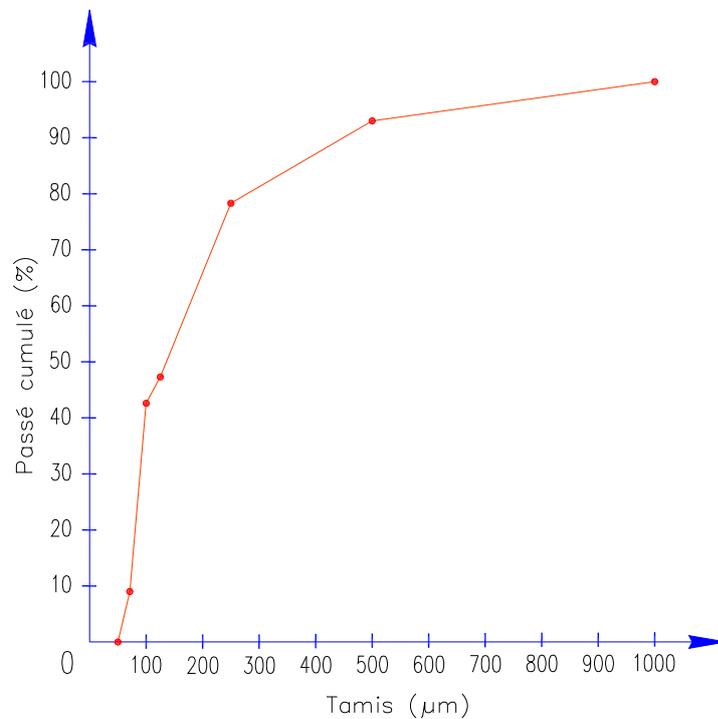


Figure 15 : Courbe granulométrique du calcin

Interprétation :

L'utilisation du broyeur au CNRIT permet d'obtenir le calcin de diamètre moins de 250 μm . Le passé cumulé pour ce tamis atteint 78,3%. Presque la moitié des grains de verre a un diamètre moins de 125 μm , plus précisément 47,3%.



Le diamètre moyenne des grains de verre qui constituent le calcin, est entre 100µm et 250µm. L'utilisation des poudres de verre très fines facilite la fusion du verre à une température 1100°C.

Conclusion :

Le broyage joue un rôle très important lors des travaux de recyclage du verre. Plus nous utilisons le calcin fin (moins de 250 µm), plus le verre fond facilement à une température 1100°C

IV.4.La composition chimique du calcin :

Tableau N°4: *Composition chimique du calcin*

constituants	Pourcentage(%)
SiO ₂	70,84
Fe ₂ O ₃	0,32
Al ₂ O ₃	2,00
CaO	10,62
MgO	0,87
K ₂ O	0,68
Na ₂ O	12,87
SO ₃	0,11
Cr ₂ O ₃	0,08
Perte au feu	1,60

Source : <http://www.samin.fr/sites/default/files/internal/l-Poudreverre/poudre-verre-PV-500-C.pdf>



IV.5. Les fondants utilisés :

IV.5.1. Le carbonate de sodium

a) Procédé d'obtention

Aujourd'hui, on obtient le carbonate de sodium à partir de chlorure de sodium (sel, NaCl) selon le procédé de Solvay. Ce procédé produit du carbonate de sodium à partir de sel (chlorure de sodium NaCl) et de craie (carbonate de calcium CaCO_3) . On obtient, en outre, du chlorure de calcium (CaCl_2) qui n'est pas un déchet mais un produit utile. Le procédé utilise également de l'ammoniac qui n'est pas totalement consommé mais peut être réutilisé.

b) Propriétés physico-chimiques

Le carbonate de sodium n'est pas toxique pour l'environnement. C'est un produit polyvalent. Néanmoins, il peut être irritant sur la peau. Aussi, il est donc préférable de le manipuler avec des gants. Il ne doit pas être confondu avec la soude caustique ni avec le bicarbonate de sodium, utilisés en cuisine, notamment dans l'élaboration des pains, d'épices...

Le carbonate de sodium réagit avec la plupart des acides pour donner du dioxyde de carbone. Il se précipite aussi par échange d'ions, de plusieurs sels métalliques solubles.

Les caractéristiques physico-chimiques du carbonate de sodium peuvent être synthétisées comme suit :

□ Propriété chimique

Formule brute : Na_2CO_3

Masse molaire : $105,9884 \pm 0,0017 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ avec C =11,33 %, Na =43,38 %, O =45,29 %.

□ Propriété physique

Température de fusion : $851 \text{ }^\circ\text{C}$ (anhydre) ;

Solubilité dans l'eau à $20 \text{ }^\circ\text{C}$: $300 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ (anhydre) ;

Masse volumique : $2,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (anhydre).

c) Utilisation du carbonate de sodium dans la fabrication de verre



Il est un ingrédient important dans la production de verre. On mélange le carbonate de sodium criblée avec du sable siliceux et on le fait cuire. Le carbonate de sodium agit comme « fondant » dans la fabrication du verre.

d) Analyse granulométrique du carbonate de sodium utilisé,

Nous avons fait l'analyse granulométrique du carbonate de sodium utilisé, c'est le tableau de résultat :

Tableau N°5 :Résultat de l'analyse granulométrique du carbonate de sodium

Rang tamis	Tamis [µm]	Diamètre moyen des particules	Refus partiel[g]	Pourcentage de refus %	Passé cumulé %
1	1000	-	-	0,0	100
2	500	750,0	3	1,0	99,0
3	250	375,0	4	1,3	97,6
4	125	187,5	214	71,3	26,3
5	100	112,5	18	6,0	20,3
6	71	85,5	33	11,0	9, 3
7	50	60,5	20	6,7	2,6
8	-	-	8	2,6	

Source :Auteur

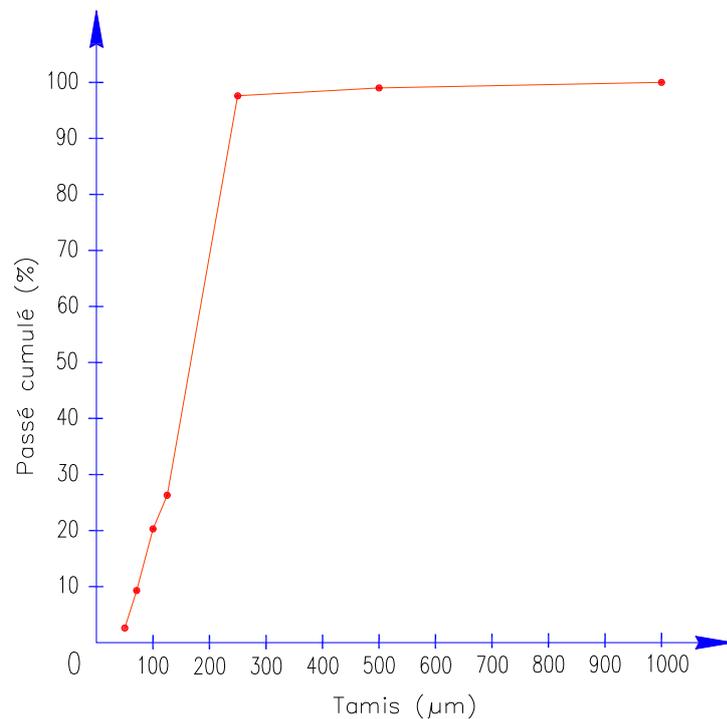


Figure16 : Courbe granulométrique du carbonate de sodium

d₁-Interprétation :

Le diamètre moyen des particules pour le carbonate de sodium est entre 125μm et 200μm. Lors de la cuisson du verre, la molécule de Na₂O favorise la fusion du verre.

Le carbonate de sodium est donc un fondant utilisé pour la fabrication du verre. On l'obtient à partir de la décarboxylation du bicarbonate de sodium à une température de 150°C. A la température plus de 1000°C, la formation de l'oxyde de sodium Na₂O facilite la fusion du calcin

C'est la réaction de la formation de l'oxyde de sodium :



 **d_2 -Conclusion:**

Le carbonate de sodium réduit le point de fusion de la poudre de silice tamisée, qui est la matière première de base du verre. Le carbonate de sodium est utilisé comme fondant du recyclage des emballages en verre

Tableau N°6 : La composition chimique du carbonate de sodium

CONSTITUANTS	POURCENTAGE %
Na ₂ CO ₃	63,09
Perte au feu	36,91

Source : CERADEL, 2009, p207

IV.5.2. Le borax :

Le borax est un fondant utilisé pour la fabrication des verres borosilicates.

a) Généralité

Le borax est un minerai de bore appelé aussi tétraborate de sodium décahydraté (cristaux blancs ou poudre cristalline) ou borate de sodium. Le borax est un sel inodore et incolore, se présentant sous forme de paillettes ou de poudre. Il peut être irritant. Sa variante déshydratée Na₂B₄O₇·5H₂O est appelée Tincalconit.

b) Propriétés

Les caractéristiques physico-chimiques du borax sont les suivantes:

§ Propriétés chimiques

Formule brute : Na₂B₄O₇·10H₂O

Masse molaire : 381,372 ± 0,035 g·mol⁻¹

Avec H = 5,29 %, B = 11,34 %, Na = 12,06 %, O = 71,32 %.

§ Propriétés physiques

Température de fusion : 75 °C (décahydraté)

Température d'ébullition : 320 °C (décahydraté)

Solubilité dans l'eau à 20 °C : 51 g·l⁻¹ (décahydraté)

Masse volumique : 1,7 g·cm⁻³ (décahydraté)

c) Utilisation du borax dans la fabrication de verre



Le Borax entre dans la composition des verres borosilicates (comme le Pyrex) où sa propriété de fondant permet d'abaisser la température de fusion, et de limiter la consommation de combustible. Environ un quart de la consommation mondiale de bore était absorbée par l'industrie de verrerie.

d) Analyse granulométrique du borax utilisé

Nous avons fait l'analyse granulométrique du borax utilisé. Voici le tableau de résultat :

Tableau N°7: Résultat de l'analyse granulométrique du borax

Rang tamis	Tamis [µm]	Diamètre moyen des particules	Refus partiel[g]	Pourcentage de refus %	Passé cumulé %
1	1000	-	8	2,6	97,3
2	500	750,0	96	32,0	65,3
3	250	375,0	134	44,7	20,6
4	125	187,5	50	16,7	4,0
5	100	112,5	4	1,3	2,6
6	71	85,5	4	1,3	1,3
7	50	60,5	4	1,3	0,0
8	-	-	-	-	

Source :Auteur

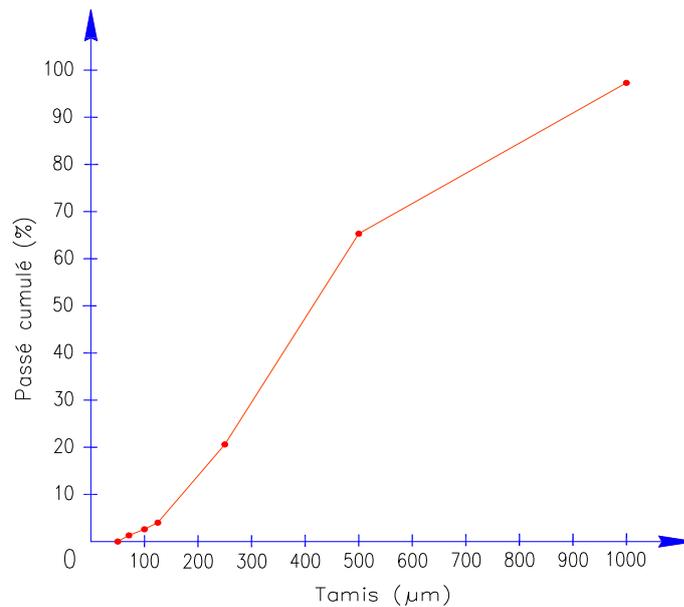


Figure 17 : Courbe granulométrique du Borax

d₁-Interprétation :

Le diamètre moyen des particules de borax utilisé est entre 375μm et 750μm. Il fond plus vite car sa Température de fusion est 75 °C. Il n'est pas nécessaire d'utiliser la poudre de borax très fine mais il vaut mieux d'ajouter le borax en poudre dans le calcin pour obtenir le mélange homogène.

d₂-Conclusion :

Le borax réduit la température de fusion du verre .L'ajout de borax permet d'économiser l'énergie lors du recyclage des emballages en verre .Nous avons pu travailler à la température maximale de 1100°C.

Tableau N°8 : Composition chimique du borax

CONSTITUANTS	POURCENTAGE %
B ₂ O ₃	68,50
Na ₂ O	30,50
H ₂ O	1,00

Source :CERADEL,2009,p207



IV.6. Le stabilisant utilisé :

On utilise l'**oxyde de plomb** (pbO) qui joue le rôle d'un stabilisant. Il abaisse également le point de fusion en stabilisant la composition.



CHAPITRE V : LES ETAPES DES TRAVAUX DE RECYCLAGE DU VERRE

V.1. PREPARATION DES ECHANTILLONS

Avant la cuisson, nous avons préparé les échantillons selon le pourcentage des constituants (calcin – stabilisant – fondant)

L'échantillon E₀ contient 100% de calcin. Pour les autres échantillons, nous faisons augmenter la proportion en stabilisant de 5% à 15%

Tableau N°9: Pourcentage des constituants des échantillons

Echantillons	CALCIN %	STABILISANT (oxyde de plomb) %	FONDANT (borax ou carbonate de sodium) %
E ₀	100	0	0
E ₁	95	5	0
E ₂	90	7	3
E ₃	90	9	1
E ₄	90	10	0
E ₅	90	11	4
E ₆	85	13	2
E ₇	85	15	0

Source :Auteur

Pour préparer ces échantillons, nous avons utilisé la balance électronique au laboratoire du Département Génie Chimique à Vontovorona



Figure 18: balance électronique au laboratoire du Département Génie Chimique à Vontovorona

V.2. LA CUISSON :

VII.2.1. Matériels utilisés :

a- le four :

Nous avons utilisé un four électrique de marque : « isuni » au Centre Energie Andavamamba. La température maximale de ce four est 1300°C. La cuisson s'est fait à une température de 1100°C

Figure 19: Photo du four de marque « USUNI »



b-Moule utilisé : moule en argile

Figure 20: Echantillon dans le moule en argile





V.2.2. Variation de température lors de la cuisson :

La cuisson se fait durant 10 heures. Il faut éviter la descente brusque de la température sinon le produit présente des fissures. La variation de température est représentée par le tableau et la courbe ci-après :

Tableau N°10: Variation de température

Température (en °C)	25	200	600	900	1000	1050	1100	900	700	300	50
Temps (en heure)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Figure 21: Courbe de variation de température :

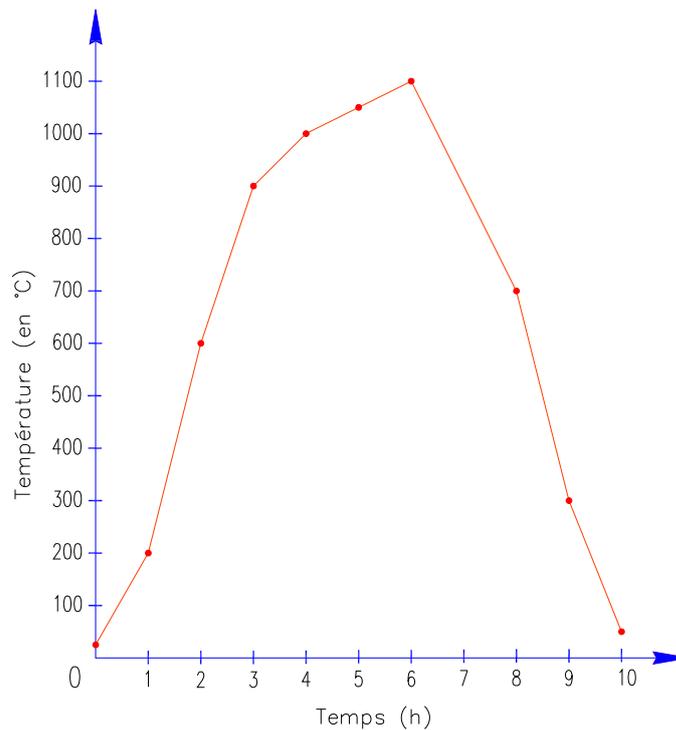
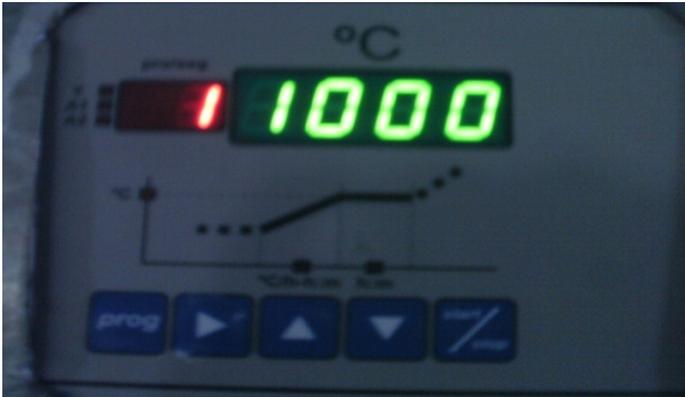


Figure 22: photo de l'affichage numérique du four



V.3. RESULTATS :

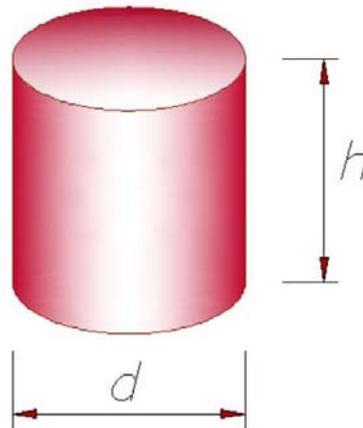
V.3.1. Test de résistance à la compression

V. 3.1.1. But

Cet essai consiste à déterminer la résistance à la compression des éprouvettes. Ils ont pour but de connaître la résistance à la compression des matériaux consolidés.

V. 3.1.2. Principe

L'essai de compression consiste en écrasement sous charge axiale d'une éprouvette cylindrique. Les éprouvettes sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture avec une vitesse de déplacement de $1\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette. Les essais de compression ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques dont les extrémités ont été rectifiées pour s'assurer de la planéité des surfaces au contact et de leur perpendicularité aux génératrices de l'éprouvette. L'éprouvette une fois rectifiée est centrée sur la presse d'essai. Pour s'assurer de la planéité des plateaux de la presse, du papier multi-plis entre l'éprouvette et les deux plateaux.



h : hauteur d : diamètre

Figure 23: Schéma simplifié de l'éprouvette cylindrique

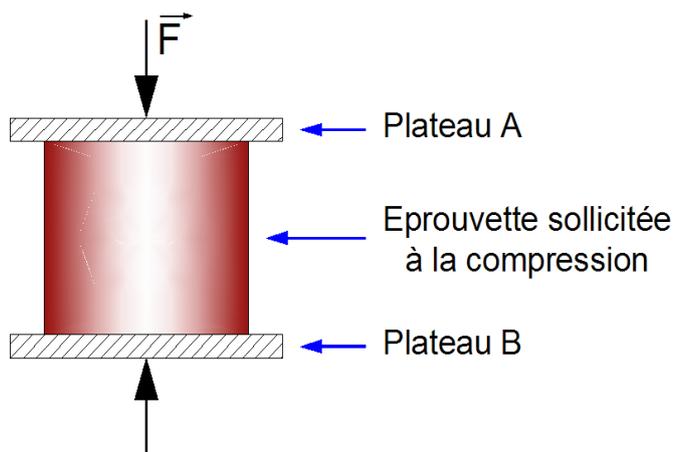


Figure 24: Eprouvette cylindrique sollicitée à la compression

On utilise la Machine multifonctionnelle du type TESTWELL au bloc technique Ankatso pour déterminer la résistance à la compression



Figure 25 :Machine multifonctionnelle du type TESTWELL

V. 3.1.3 Expression des résultats

On note la force appliquée à la rupture (lecture sur le cadran en daN). La résistance à la compression simple R_C s'exprime par le rapport de la force appliquée à la section de l'éprouvette (en mm^2).

Par convention, la résistance à la compression simple est :

$$R_C = \frac{F}{S}$$

Avec : R_C : résistance à la compression (daN/mm^2)

F : force appliquée à la rupture (daN)

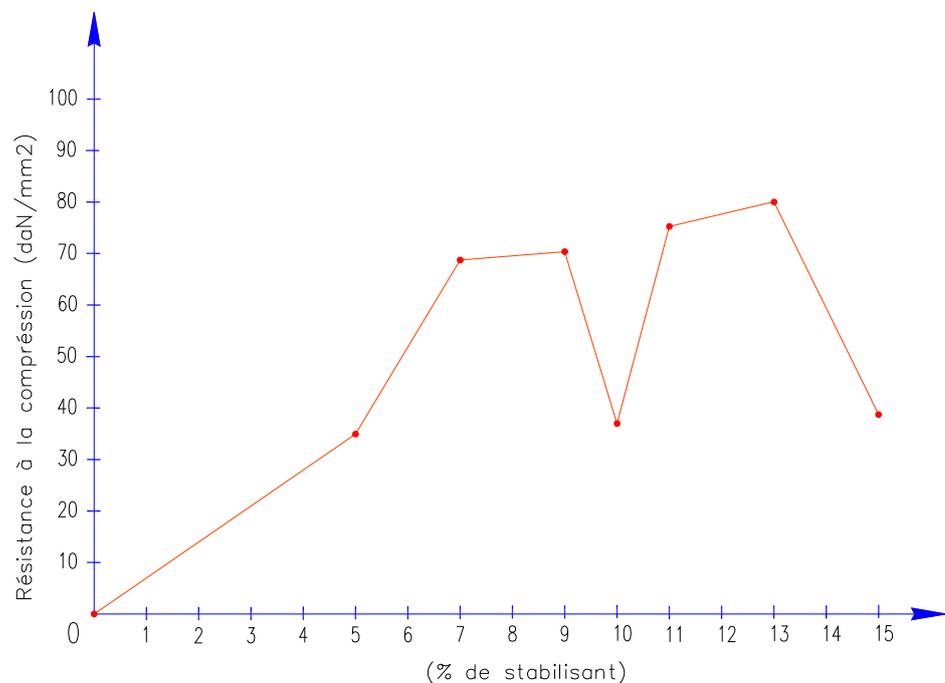
S : section de l'éprouvette (mm^2)

V.3.1.4 Résultat de la résistance à la compression

Tableau N°11: Résultat de la résistance à la compression

Echantillons	d(mm)	S(mm ²)	F(daN)	Résistance à la compression [daN/mm ²]
E ₀	-	-		-
E1	12,3	118,762	4150	34,943
E2	12,1	114,931	7900	68,736
E3	12,0	103,040	7250	70,361
E4	12,1	114,931	4250	36,978
E5	11,6	105,629	7950	75,263
E6	11,7	113,040	9050	80,060
E7	12,3	118,762	4600	38,732

Figure 26 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de la teneur de stabilisant



On ne peut pas mesurer la force maximale appliquée F pour E₀ à cause de sa



cassure avant la mesure. Les diamètres des échantillons sont différents car les molles utilisées lors la cuisson ne sont pas identiques.

V. 3.1.5. Interprétation :

Ces résultats nous montrent que, la résistance à la compression est très faible lorsqu'on n'utilise que le stabilisant (oxyde de plomb) pour les échantillons E1,E4 et E7.La résistance à la compression augmente pendant l'utilisation du fondant(borax ou carbonate de sodium) .Cet augmentation est due à la diminution de la température de fusion c'est-à-dire à la température 1100°C , le calcin est bien fondu .Lors du refroidissement de la pâte de verre, on obtient progressivement un verre compact .C'est le cas des échantillons E2,E3,E5 et E6

Plus le pourcentage de stabilisant s'élève, plus la résistance à la compression augmente car le verre obtenu est plus stable. L'utilisation de ce stabilisant permet d'éviter la présence des cassures et des bulles d'air dans le produit.

La résistance à la compression du verre est 100daN/mm² ou 1000 N/mm² .Les échantillons E5 et E6 ont les résistances plus proches de celle du verre mais elles n'atteignent pas cette valeur à cause de la diminution de la proportion en silice dans la composition de l'échantillon.

V. 3.1.6 Conclusion :

Pour diminuer la température de fusion du verre, on utilise le fondant. La mise en forme du verre à recycler peut se faire à la température de 1100°C

Le stabilisant joue un rôle très important à la formation du verre. Il rend stable le produit verrier obtenu.

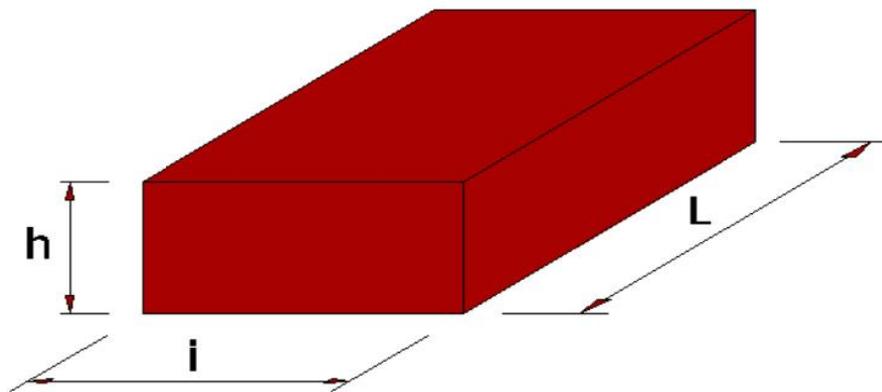
V.3.2. Test de résistance à la flexion

V.3.2.1. But

Cet essai consiste à déterminer la résistance à la flexion des éprouvettes.

V.3.2.2. Principe

L'essai se fait sur l'éprouvette parallélépipédique reposant sur deux appuis parallèles A et B ; on applique au milieu une charge F que l'on fait croître graduellement jusqu'à la rupture qui se produit au milieu de l'éprouvette.



h : hauteur l : largeur L : distance entre deux appuis

Figure27: Schéma simplifié d'une éprouvette parallélépipédique

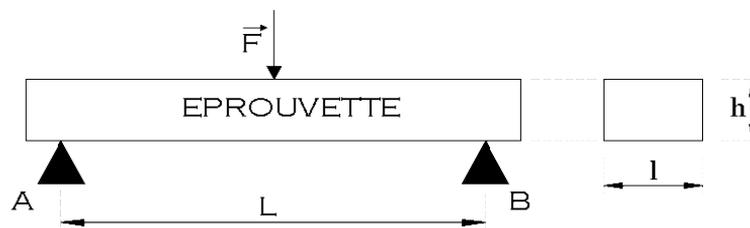


Figure 28: Eprouvette parallélépipédique sollicitée à la flexion

V.3.2.3. Expression des résultats

On note la force appliquée à la rupture (lecture sur le cadran en daN). La résistance à la flexion simple R_f est définie par :

$$R_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot l \cdot h^2}$$

Avec : R_f : résistance à la flexion (daN/mm²)

F : Force maximale appliquée (daN)

L : Distance entre les deux appuis (mm)

l : Largeur de l'éprouvette (mm)

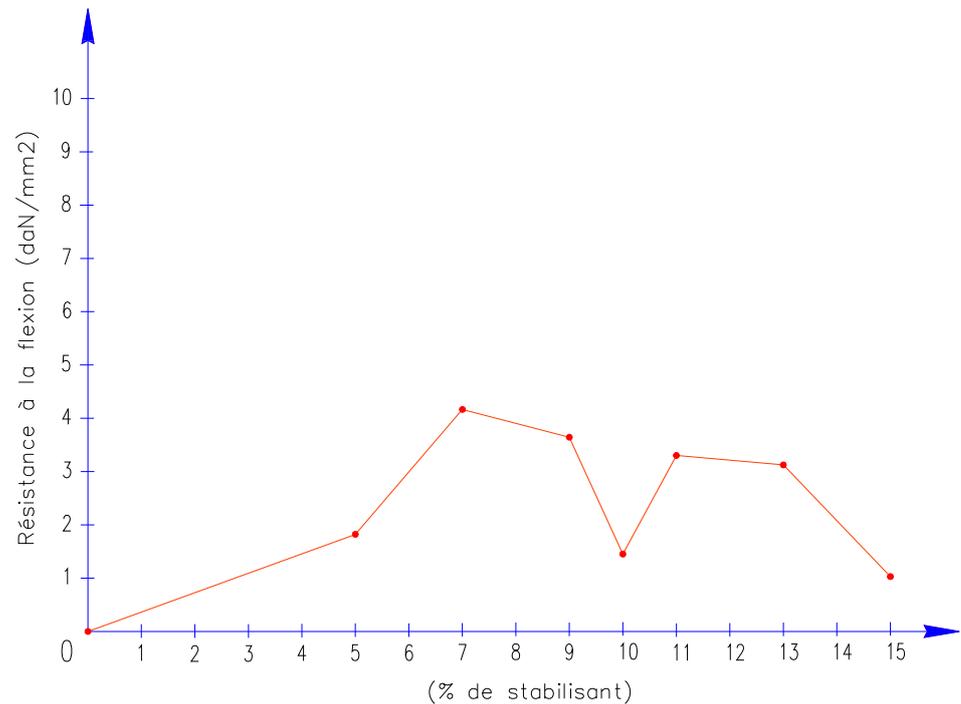
h : Hauteur de l'éprouvette (mm)

V.3.2.4 Résultat de la résistance à la flexion

Tableau N°12 : Résultat de la résistance à la flexion

Echantillons	L(mm)	l(mm)	h(mm)	F(daN)	Résistance à la flexion R_f (daN/mm ²)
E ₀	-	-	-	-	-
E1	50	40	6	35	1,822
E2	50	40	6	80	4,166
E3	50	40	6	70	3,645
E4	50	43	6	30	1,453
E5	50	41	6	65	3,302
E6	50	40	6	60	3,125
E7	50	40	6	25	1,302

Figure 29 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction de la teneur de stabilisant



On ne peut pas mesurer la force maximale appliquée F pour E_0 à cause des acassure avant la mesure.

V.3.2.5 Interprétation

Lorsqu'on n'utilise que le stabilisant(oxyde de plomb) avec le calcin,la résistance à la flexion du verre obtenu est très faible pour les échantillons E_1, E_4 et E_7 . L'ajout de fondant permet d'augmenter sa résistance à la flexion après le recyclage.

Ces résultats montrent que la résistance à la flexion diminue lorsque la proportion en oxyde de plomb(stabilisant) dans le mélange (calcin-stabilisant-fondant) augmente. Il est vérifié que l'oxyde de plomb rend le verre plus éclatant (voir.1-4-2-2.Les stabilisants)

La résistance à la flexion du verre est 4 daN/mm^2 ou 40 N/mm^2 . L'échantillon E_2 a la résistance plus proche de cette valeur.

V.3.2.6. Conclusion



Le verre n'est pas flexible. Cette propriété du verre est due à sa résistance à la flexion très faible.

V.3. 3. Test de dureté

V.3.3.1. But

Ce test consiste à déterminer la dureté d'un produit en le référant dans l'échelle de Mohs par des chiffres 1 jusqu'au 10

V.3.3.2. Principe

On fait rayer un produit par un matériau connu. S'il est rayable par ce matériau. Il a une dureté inférieure.

V.3.3.3. Echelle de Mohs

L'échelle de Mohs représente la dureté par des chiffres 1 jusqu'au 10

La dureté du verre est 6,5 c'est-à-dire entre la dureté de l'acier et celle du quartz (voir Annexe 1)

V.3.3.4. Résultat de la dureté

Nous avons utilisé un ciseau en acier et un morceau de quartz pour déterminer la dureté des échantillons. Ce tableau ci-après montre les résultats

Tableau N°13: Résultat de la dureté

Echantillons	Résultat	dureté
E0	Il raye l'acier mais il est rayable par le quartz.	Entre 6 et 7
E1	Il raye l'acier mais il est rayable par le quartz.	Entre 6 et 7
E2	Il raye l'acier mais il est rayable par le quartz.	Entre 6 et 7
E3	Il raye l'acier mais il est rayable par le quartz.	Entre 6 et 7
E4	Il raye l'acier mais il est rayable par le quartz.	Entre 6 et 7



E5	Il raye l'acier mais il est rayable par le quartz.	Entre 6et 7
E6	Il raye l'acier mais il est rayable par le quartz.	Entre 6et 7
E7	Il raye l'acier mais il est rayable par le quartz.	Entre 6et 7

V.3.3.5 Interprétation

La dureté de tous les échantillons est entre 6 et 7 car la composition du verre obtenu après le recyclage est la composition du verre sodo-calcique malgré l'utilisation du stabilisant oxyde de plomb car nous ajoutons moins de 16% d'oxyde de plomb pour chaque échantillon. Pour les comparer, on donne un exemple de composition du verre au plomb : Silice 62% + Oxyde de plomb 21% + Potasse 7%.

On peut dire alors que le verre obtenu est un verre de type sodo-calcique mais la composition varie selon le fondant utilisé.

Tableau N°14:Composition chimique du verre pour le fondant -carbonate de sodium

Constituants	Pourcentage (%)
SiO ₂	67,30
Fe ₂ O ₃	0,30
Al ₂ O ₃	1,90
NaCO ₃	5,00
CaO	10,01
MgO	0,82
K ₂ O	0,65
Na ₂ O	12,23
SO ₃	0,10
Cr ₂ O ₃	0,08
Perte au feu	1,60

Source :[3]

Tableau N°15:Composition chimique du verre pour le fondant- borax

Constituants	Pourcentage (%)
SiO ₂	67,30
Fe ₂ O ₃	0,30
Al ₂ O ₃	1,90



B ₂ O ₃	3,45
CaO	10,01
MgO	0,82
K ₂ O	0,65
Na ₂ O	13,74
SO ₃	0,10
Cr ₂ O ₃	0,08
Perte au feu	1,65

Source :[3]

L'ajout du stabilisant apporte autre constituant PbO dans la composition du verre mais il reste minoritaire par rapport aux constituants CaO et Na₂O

V.3.3.6 Conclusion

Le verre obtenu est un verre de type sodo-calcique. Ce type est la principale matière première à la fabrication des emballages en verre(bouteilles,bocals,...).La dureté du verre obtenu après la cuisson du calcin est entre 6 et 7.Cette valeur vérifie la dureté du verre 6,5

V.4. CONCLUSION :

Le verre est un matériau recyclable à 100 %, sans perte de qualité ni de quantité. Avec une bouteille recyclée, on refait une bouteille neuve, en tout point semblable à la bouteille d'origine et ce cycle peut se reproduire à l'infini. Outre l'économie de matière première qui est de l'ordre de 700 kg de sable par tonne de verre fabriquée, l'utilisation du verre recyclé ou calcin permet une économie d'énergie de 100 kg de fioul par tonne (la température de fusion du calcin étant inférieure à celle du sable).Certains verres plats et verres techniques (verre de miroiterie pare brise, vitres latérales..) sont recyclés de la même manière que les emballages mais ils ne doivent pas être mélangés entre eux car leur composition chimique est différente.



PARTIE III :
ETUDES
SOCIO-ECONOMIQUES
DU PROJET



CHAPITRE VI: CONTEXTES DU PROJET

VI.1. GESTION DE DECHETS

La quantité d'ordures à Antananarivo est de 600 tonnes par jour pour 500 bacs répartis dans toute la ville. (In Midi Madagascar du Mercredi 19 janvier 2005)
Madagascar devrait donc mettre en place un projet qui permet d'appliquer une bonne gestion des déchets et de traiter les résidus ménagers afin de les recycler.

VI.1.1. Objectifs de la gestion des déchets :

La gestion des déchets a pour objet :

- **De prévenir ou réduire la production et la nocivité des déchets**, notamment en agissant sur la fabrication et sur la distribution des produits ;
- **D'organiser le transport des déchets** et d'en **limiter** la distance et le volume ;
- **De valoriser les déchets** par réemploi, recyclage ou toute autre action visant à obtenir à partir des déchets des matériaux réutilisables ou de l'énergie ;
- **De stocker les déchets non valorisables et non recyclables sur des sites spéciaux**, conçus de manière à minimiser les impacts sur l'Environnement physique et humain ;
- **D'assurer l'information du public** sur les effets pour l'Environnement et la santé publique des opérations de production et d'élimination des déchets, ainsi que sur les mesures destinées à en prévenir ou à en compenser les effets préjudiciables.

Ces finalités s'inscrivent en complément des **principes généraux**, tels que :

- Le **principe pollueur-payeur**, selon lequel les frais, résultant des mesures de prévention, de réduction de la pollution et de lutte contre celle-ci, doivent être supportés par le pollueur;
- Le **principe de participation**, selon lequel chacun doit avoir accès aux informations relatives à l'Environnement, y compris celles relatives aux substances et activités dangereuses. **[17]**



VI.1.2. Organes de gestion des déchets :

Seules les régions d'Antsirabe et d'Antananarivo bénéficient d'organe de gestion des déchets règlementaire.

A Antananarivo , quelques entreprises privées se chargent de la collecte des déchets mais on ne citera ici que deux organes importantes :

- SAMVA
- CUA

a- SAMVA : Service Autonome de Maintenance de la Ville d'Antananarivo

Malgré qu'elle soit autonome, le SAMVA doit établir une demande d'aide financière à la CUA pour assurer les services qu'il fournit en matière de déchets. Pour cela, il doit acquérir des matériels de communication afin de rester en contact avec les usagers pour pouvoir les contrôler de près.

Il veille à la réparation du pont bascule pour équilibrer le tonnage d'ordures qui arrivent à Andralanitra et fixe le prix qu'il faut payer pour ce transport.

Au niveau des fokontany , il contrôle le respect par la population du moment, de l'endroit pour jeter les ordures. Pour cela, il doit impérativement coopérer avec ces fokontany.

b- La CUA : Commune Urbaine d'Antananarivo

Ce service a pour rôle principal d'assurer la bonne marche de la gestion des déchets. Il s'occupe, par conséquent de la réhabilitation et de la construction des canaux d'évacuation. L'assainissement de la ville fait partie intégrante de ses activités. Dans ce contexte, on peut citer ; l'augmentation du nombre de WC publics, le suivi et le respect de la loi d'hygiène, le traitement des eaux usées industrielles. Cette dernière doit être réalisée par la firme elle-même.

La SAMVA et la CUA ne suffisent pas pour la gestion des déchets de la ville d'Antananarivo. Les organes de traitement des déchets n'existent pas encore. [17]

VI.2.IMPORTATION DE VERRE

En 1967, une industrie verrière était créée à Tamatave par le groupe Tourés et le gouvernement Malgache, mais l'usine Société Verrière de Madagascar (SOVEMA) fermait définitivement ses portes en Août 1984 suite à une situation financière catastrophique jusqu'à présent, Madagascar ne possède pas d'unité de verrerie. Les verres utilisés à Madagascar sont tous importés. Ces verres sont importés soit des pays Européens soit des pays Asiatiques soit de la République Sud Africaine

Tableau N°16: Importation du verre

ANNEE	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Valeur en CAF(Ar)	9.084.480.605	6.742.006.023	18.782.441.934	13.109.940.207	15.189.951.167	15.475.443.843
Poids net(kg)	7.101.726	4.679.011	6.553.086	8.983.711	8.644.737	9.045.482

Source : DGINSTAT/DES/SSES/COMEXT/Janvier 2011

On constate l'augmentation de la valeur de l'importation de verre pour les trois dernières années du tableau. L'utilisation du verre prend une place importante à Madagascar. L'importation du verre devient une énorme dépense en devise pour Madagascar.

Dans ce cas, nous avons fixé comme clientèle cible, les sociétés qui fabriquent de produits alimentaires, pharmaceutiques, d'huile essentiels, de yaourt artisanal, de boissons alcooliques, de parfum qui ont besoin de verre d'emballage fiable et en bonne qualité.

Malgré l'absence de producteur de verre d'emballage à Madagascar, ce dernier est obligé d'importer ces emballages.

L'évolution de l'importation d'emballage en verre à Madagascar de 2002 à 2008 est présentée dans le tableau. De ce même date, la quantité importée est passée de 3 148 673 Kg à 7 946 867 Kg. Nous allons voir dans ce tableau ci-après :



Tableau N°17 : Evolution de la quantité d'importation d'emballage en verre à Madagascar (2002 à 2008 par kg et en indice)

Année	2 002	2 003	2 004	2 005	2 006	2 007	2 008
Total général	3 148 673	7 632 764	8 373 983	5 941 741	3 863 903	4 701 069	7 946 867
Indice*	1,00	2,42	2,66	1,89	1,23	1,49	2,52

Source : INSTAT, Juillet 2010

*Calcul d'indice, $I = T_1 / T_0$

Tableau N°18: Répartition de l'importation d'emballage en verre à Madagascar selon les pays exportateurs en 2008

N°	Pays exportateurs	Poids net en kg	Pourcentage
1	Chine	2 883 609	36,29%
2	Indonésie	1 526 538	19,21%
3	Tanzanie	849 711	10,70%
4	France	672 869	8,47%
5	Autres pays*	2 014 141	25,33%
	Total général	7 946 867	100,00%

Source : INSTAT , Aout 2010

Plusieurs consommateurs demandent d'emballage en verre, notamment les entreprises qui produisent la confiture, les alimentaires, les huiles essentiels, les parfums, les boissons, les yaourts artisanales,... En effet, nous avons constaté qu'il n'y a pas de producteur des emballages en verre chez nous, alors les demandeurs les importent. A cause de cette importation, une augmentation du prix est notée à cause de la taxe douanière, le coût de transport.

Nous savons aussi qu'il y a des risques pour l'importation de verre d'emballage notamment le retard de livraison à cause de climat, l'accident durant le transport. Pour justifier cette demande, nous allons citer ci-dessous quelques exemples d'entreprises qui utilisent des emballages en verre :[14]



- CODAL SA
- LECOFRUIT
- COFARMA
- HOMEOPHARMA
- RATSIMAMANGA
- STAR
- ROYAL Spirits & Cie
- LAZAN'NY BETSILEO
- COMADIS
- SODIAM
- BON GOUT
- SKOL
- DZAMA

Le recyclage des déchets comme le verre va certainement contribuer au développement économique de Madagascar.

VI.3.PRODUCTION MONDIALE DE VERRE

La production mondiale de verre en 2000 atteint 5 523 480 tonnes.

Tableau N°19: La production mondiale de verre selon les types

Types de verre	Verre creux	Verre plat	Fil de verre	Verre technique
Poids(t)	4 353 000	860 600	208 540	114 340
Pourcentage(%)	78	16	4	2

Source : **[14]**

Au niveau mondial, l'utilisation du verre se multiplie dans différents domaines surtout la fabrication des emballages en verre surtout les bouteilles.

D'après ces chiffres, le choix du sujet est justifié c'est-à-dire le recyclage du verre à Madagascar devient actuellement apprécié, l'implantation d'une usine de recyclage du verre doit être un projet important pour notre économie

VI.4. RECYCLAGE DU VERRE DANS LES PAYS DEVELOPPES

VI.4.1.Union Européenne

Selon les dernières estimations concernant le recyclage du verre, de mars 2012, et un an avant les données officielles fournies par Eurostat - **le taux de recyclage de verre** en moyenne dans l'Union européenne reste **stable à 68%**. Cela signifie qu'environ 25 milliards de bouteilles et pots en verre ont été collectés dans toute l'Union européenne en 2010.



Figure 30: bouteilles obtenues après le recyclage du verre

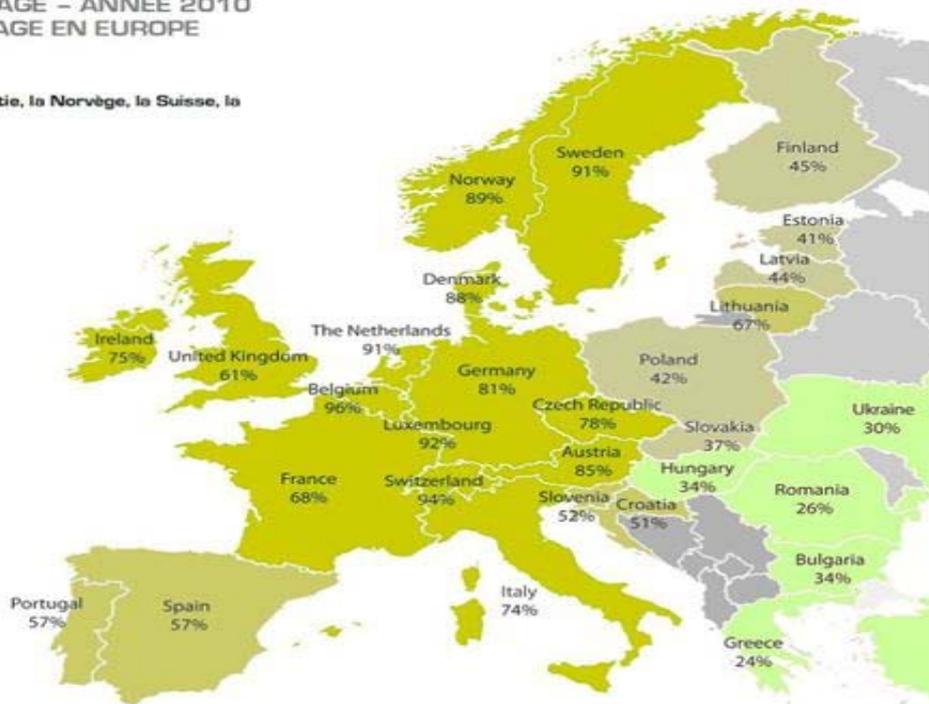
Alors que l'industrie réutilise l'ensemble du verre collecté, le **recyclage en boucle fermée** apporte des avantages environnementaux importants. En effet, ce recyclage permet de ne pas utiliser de nouvelles matières vierges :

- **80%** des bouteilles et bocaux en verre collectés sont recyclés dans un système de recyclage en boucle fermée.
- Concernant la France, le taux de recyclage atteint, en 2010, **67,59%**.

Figure 31: taux de recyclage du verre en Europe en 2010

VERRE D'EMBALLAGE – ANNEE 2010
TAUX DE RECYCLAGE EN EUROPE

TAUX MOYEN :
EU27 : 67.56%
EUROPE (incluant la Croatie, la Norvège, la Suisse, la
Turquie) : 66.86 %



Le taux de recyclage du verre était de **68 %** en France fin 2010, un peu en dessous de la norme européenne (60%) et très loin derrière le taux de recyclage allemand, qui s'élève à 81%.

Des progrès ont été réalisés – ainsi 67% des européens recycleraient leur verre en 2009 selon la FEVE (Fédération Européenne du verre emballage) – mais il demeure encore une importante marche à franchir afin de ne plus voir de déperdition énergétique

La progression du taux de recyclage est le résultat des efforts fait conjointement par les particuliers, les verriers et Eco-Emballages qui se doivent de respecter la loi qui fixe à 75% de taux de recyclage de l'ensemble des emballages. Compte tenu des taux de chaque matériau, l'objectif que se fixe le verre est de l'ordre de 80%.**[38]**



VI.4.2. Normandie- France:

Dans la région du Grand Sud-Ouest, de la Normandie et du Centre de la France se fait dans l'usine IPAQ construite en 1991 sur 3 hectares pour un investissement de 2,3 M €, cette usine emploie 20 personnes. Cette unité de recyclage de verre a une capacité de production de calcin de 160 000 tonnes/an

En 2007, elle a alimenté à hauteur de 160 000 tonnes, les fours de l'usine O-I à Vayres. Les besoins de la verrerie pour 2008 sont passés à 210 000 tonnes pour une capacité de produits finis de 270 000 tonnes nettes, dont 80 % en bouteilles bordelaises de teinte verte.

La maîtrise du traitement du calcin passe par la qualité qui doit être compatible avec l'utilisation du verre recyclé dans les fours verriers.

L'usine de recyclage de verre d'Izon a adapté ses installations en associant les technologies de tri telles que : courant de Foucault, tri optique laser, tri optique à balayage numérique et détection UV pour tendre vers une qualité homogène.

Plus de 7 bouteilles sur 10 sont aujourd'hui collectées et recyclées en France. 2 millions de tonnes de verre d'emballage ont été collectées et recyclées en 2012[38].

VI.4.3. Au Japon:

La création d'une société de recyclage des déchets est entrée en vigueur en 2001 au Japon dans laquelle la consommation des ressources naturelles et les impacts sur l'environnement sont minimisés[37]



CHAPITRE VII: ETUDE FINANCIERE DE L'USINE

VII.1. LIEU D'IMPLANTATION :

Le domaine de création du projet se trouve dans la ville d'Antananarivo. Ce choix n'est pas fait par hasard car il n'y a pas encore d'entreprise qui assure ce type d'activité dans la capitale d'Antananarivo alors que les demandeurs sont très nombreux. En effet, il est préférable de créer ce projet en vue de satisfaire les besoins des clients en matière d'emballage.

Il faut donc implanter l'usine de recyclage de verre près de la grande ville comme Antananarivo pour faciliter la collecte des déchets en verre.

VII.2. BATIMENTS :

Tableau N°20: trois bâtiments nécessaires :

Bâtiment 1	Le bureau administratif
Bâtiment 2	salles des machines pour les traitements du calcin :nettoyage,concassage,tamissage,broyage,...) et salles de fonte
Bâtiment 3	magasin de stockage pour les déchets de verre et pour les produits finis

Source :Auteur

VII.3. COUT DE CONSTRUCTION : CC

Le coût de construction dépend du changement des prix des matériaux de construction

**Tableau N°21 : Coût de construction**

<i>Désignation</i>	<i>unité</i>	<i>quantité</i>	<i>PU(Ar)</i>	<i>PT(Ar)</i>
Terrain	<i>m²</i>	<i>800</i>	<i>40000</i>	<i>32 000 000</i>
<i>Matériau de construction</i>	-	-	-	<i>30 000 000</i>
<i>Main d'œuvre</i>	-	-	-	<i>8 000 000</i>
<i>transport</i>	-	-	-	<i>1 000 000</i>
TOTAL				<i>47 000 000</i>

Source :Auteur

CC=47 000 000 Ar**VII.4. COUT DES MATERIELS ET DES CAMIONS : CMC****Tableau N°22:Coût des matériels et des camions**

<i>DESIGNATION</i>	<i>NOMBRE</i>	<i>PU</i>	<i>PT</i>
<i>Concasseur</i>	<i>1</i>	<i>20 000 000</i>	<i>20 000 000</i>
<i>Broyeur</i>	<i>1</i>	<i>20 000 000</i>	<i>20 000 000</i>
<i>tamis</i>	<i>1</i>	<i>250 000</i>	<i>250 000</i>
<i>Camion</i>	<i>2</i>	<i>150 000 000</i>	<i>300 000 000</i>
<i>Imprévue</i>	-	-	<i>10 000 000</i>
		<i>TOTAL</i>	<i>350 250 000</i>

Source :Auteur

CMC= 350 250 000 Ar**VII. 5. COUT TOTAL DES INVESTISSEMENTS:CTI**

Le coût total des investissements est la somme de l'argent investie dans la construction de l'usine jusqu'à la mise en marche :

$$\text{CTI} = \text{CC} + \text{CMC}$$

$$\text{CTI} = 47\,000\,000 + 350\,250\,000$$



CTI= 497 250 000

VII.6 LE FRAIS DE DEMARRAGE :FD

C'est l'ensemble de la charge variable et la charge du personnel en un mois :

$$FD=(CV+CP)/12$$

a- Charge variable CV

C'est le coût de la matière première et de l'électricité-eau pendant une année (comportant environ 240jours ouvrables).Le calcin utilisé peut atteindre 5t par jour

Tableau N°23: Charge variable

désignation	Unité	Quantité	PU(Ar)	PT(Ar)
Matière première(débris de verre, bouteille de verre,...)	Tonne	5x240j =1200	200 000	240 000 000
électricité	Kwh	30x8hx240j =57 600	236	13 593 600
eau	m ²	8x240j =1920	618	1 186 560
TOTAL				254 780 160

Source :Auteur

b- Charge du personnel CP

La charge du personnel est l'ensemble des salaires annuels du personnel

**Tableau N°24: Charge du personnel**

Personnel	Salaire mensuel(Ar)	Nombre de mois	effectif	Salaire annuel(Ar)
Directeur	800 000	12	1	9 600 000
Responsables administratifs et financiers	600 000	12	5	36 000 000
chauffeurs	300 000	12	2	7 200 000
ouvriers	300 000	12	18	64 800 000
Gardien	200 000	12	1	2 400 000
			Total	120000 000
			Charge sociale20%	24 000 000
			TOTAL à payer	144 000 000

Source :Auteur

$$FD=(254\ 780\ 160+144\ 000\ 000) :12$$

$$FD=33\ 231\ 680Ar$$

VII.7. L'AMORTISSEMENT :A

Si le remboursement du coût total des investissements dure 5 ans c'est-à-dire $n=5$;l'amortissement peut calculer par cette formule :

$$A=CI/n$$

CI :C'est le capital investi qui est la somme du cout total des investissements **CTI** et le frais de démarrage **FD**

$$A=(CTI+FD) /5=(497\ 250\ 000 + 33\ 231\ 680) /5$$

$$A=106\ 096\ 336\ Ar$$

L'amortissement annuel est donc 106 096 336 Ar



VII.8. LA CHARGE FIXE : CF

C'est la valeur totale des charges fixes par an qui est la somme de la rémunération du personnel et l'amortissement

Tableau N°25 :Charge fixe

DESIGNATION	MONTANT(Ar)
Rémunération du personnel	144 000 000
Amortissement	106 096 336
TOTAL	250 096 336

Source :Auteur

VII.9. LE COUT OPERATOIRE :CO

Le cout opératoire **CO** comprend les charges fixes et l'ensemble des charges variables pendant un an

$$\text{CO}=\text{CF}+\text{CV}=250\,096\,336 + 254\,780\,160 =\mathbf{504\,876\,496\,Ar}$$

VII.10.LECHIFFRE D'AFFAIRE ANNUEL : CA

Le calcin obtenu pour la fabrication des bouteilles et autres outils atteint 1200 T par an. L'estimation du prix de calcin est 820 000Ar par tonne

Tableau N°26: Chiffre d'affaire annuel

Quantité de calcin produit par an	1200 T
Prix de 1Tonne de calcin	820 000 Ar
CHIFFRE D'AFFAIRE ANNUEL	984 000 000 Ar

Source :Auteur

**VII.11.MARGE SUR COUT VARIABLE – SEUIL DE RENTABILITE****Tableau N°27 :Marge sur coût variable – Seuil de rentabilité**

Marge sur coût variable : MCV	MCV=CA-CV =984 000 000 – 254 780 160 =729 219 840 Ar
Seuil de rentabilité :SR	SR= (CA x CF) / MCV =(984 000 000 X 250 096 336) / 729 219 840 =337 476 822 Ar
Délai pour atteindre le seuil de rentabilité	(SR x Temps d'activité) / CA =(337 476 822 x 240j) / 984 000 000 = 83 jours

Source :Auteur

Après 83jours de fonctionnement, l'usine atteint le seuil de rentabilité

**VII.12. Rentabilité :****Tableau N°28: Tableau de rentabilité**

Resultat :RES	= CA-CV- CP = 984 000 000 - 254 780 160 - 144 000 000 = 585 219 840
Rentabilité commerciale RC	= RES/ CA = 585 219 840 /984 000 000 = 0,59= 59 %
Rentabilité économique RE	=RES /CO = 585 219 840 /504 876 496 Ar = 1,15= 115 %

Source : Auteur

VII.13.Evaluation du projet

Le succès d'un projet peut être apprécié selon les indicateurs ci – après :

VII.13.1. Pertinence

D'après l'analyse économique du projet, celui-ci procure un avantage économique pour le pays grâce à sa rentabilité économique **115%**. L'objectif global est la valorisation des déchets à Madagascar. Pour le cas du verre, le verre peut se recycler infiniment et sans aucune perte, ni qualitative, ni quantitative : il garde toutes ses propriétés mécaniques et physico-chimiques. Le verre recyclé peut être alors utilisé une nouvelle fois dans les emballages alimentaires ou autres objets. Dans l'analyse financière, les résultats nets par année sont positifs et évoluent d'une manière croissante d'année en année. Donc, toutes ces caractéristiques montrent la pertinence du projet.



VII.13.2. Efficience

D'après l'indicateur de performance, le taux de marge est très élevé. Ce rapport permet de déceler l'utilisation optimale des gestions des déchets pour faire sortir des résultats positifs .La seuil de rentabilité est atteint en 83jours de fonctionnement ; ce qui montre que le projet peut être entrepris grâce à son efficience.

VII.13.3. Impact

L'existence de ce projet répond certaines attentes des bénéficiaires comme la création d'emploi, la satisfaction des besoins des entreprises de boisson comme STAR ,SKOL ,DZAMA, la création d'autres activités nouvelles liées aux opérations de collecte et de traitement du verre. . Il participe au développement socio-économique du pays par le biais de création des valeurs ajoutées. Cela permet d'accroître le produit intérieur brut (PIB) du pays. Ainsi, le projet a un impact positif sur la situation économique du pays.



CHAPITRE VIII: ETUDE TECHNIQUE DE REALISATION

Dans ce chapitre, nous parlerons de l'étude technique, c'est-à-dire, le processus de travail, notamment le recyclage

Nous allons résumer les méthodes de travail pour avoir les emballages en verre. Ces emballages doivent suivre de norme et de qualité exigée par les utilisateurs. Avant de développer le processus de production, nous allons aborder le recyclage.

VIII.1. Le recyclage

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets (déchet industriel ou ordures ménagères) qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui composaient un produit similaire arrivé en fin de vie, ou des résidus de fabrication. L'un des exemples qui illustre ce procédé est celui de fabrication de bouteilles neuves avec le verre de bouteilles usagées. Le recyclage de verre apparaît après le second choc pétrolier de 1974 à cause de l'augmentation de coût de l'électricité.

Donc, nous pouvons dire que le verre est un déchet inerte, non toxique, non dégradable, non compostable. Mais il reste une matière première réutilisable pouvant être recyclé à l'infini tout en gardant ses propriétés. Les déchets de verre une fois broyés donnent le « Groisil » ou « Calcin ».

De plus, une tonne de verre recyclé économise 1,17m³d'eau et 1,46MWh d'énergie.

Concernant les gaz à effet de serre, il est à remarquer que le recyclage d'une tonne de verre permet d'éviter le rejet de 315kg de CO₂ dans l'atmosphère. Soit environ 45% de moins que la production à partir des matières premières naturelles. Passons maintenant au processus de production.

VIII.2. Méthode de production

La production est le stade qui donne vie au produit et qui sera générateur de revenus pour l'entreprise, la production nécessite un processus très longue et des étapes minutieuses telle que :



-**le triage** : c'est le fait de trier les verres collectés c'est-à-dire enlever ceux qui ne sont pas recyclables et aussi séparer les verres transparents et ceux de couleur.

-**Le broyage** : il consiste à broyer le verre pour le transformer en poudre appelé calcin ou groisil pour servir de matière première.

-**Fusion ou enfournage** : cette étape vise à rendre le calcin mélangé avec les matières de conditionnement en liquide dans le four. Ce dernier est une cuve en matériaux réfractaire dans laquelle la composition est fondue par la chaleur de 1550°C.

-**Affinage** : c'est un enlèvement des déchets de matériaux qui sont nuisibles à la production et rendra le produit de mauvaise qualité.

-**Conditionnement thermique** : le mélange est mis à la température (à 1150° C) pour avoir les paraisons idéales pour le bon moulage.

-**Formage et moulage** : La goutte de verre en fusion, appelée paraison, est soufflée dans un moule ébaucheur puis dans un moule finisseur placé sur la machine qui fabrique les emballages. Pendant le formage, la température varie de 1000°C à 800°C.

-**Traitement de surface** : il s'agit de bien ajusté le produit, enlever les rebords.

-**Recuison** : cela est fait pour solidifier le verre. Il sera trop fragile et très cassable lorsqu'on diminue brusquement la température.

-**Traitement de surface** : c'est la phase de polissage et de lissage.

-**Contrôle** : cela consiste à voir les produits qui ne suivent pas les normes, les produits qui ne passent pas le test de contrôle seront renvoyés au centre de broyage pour être retraités.

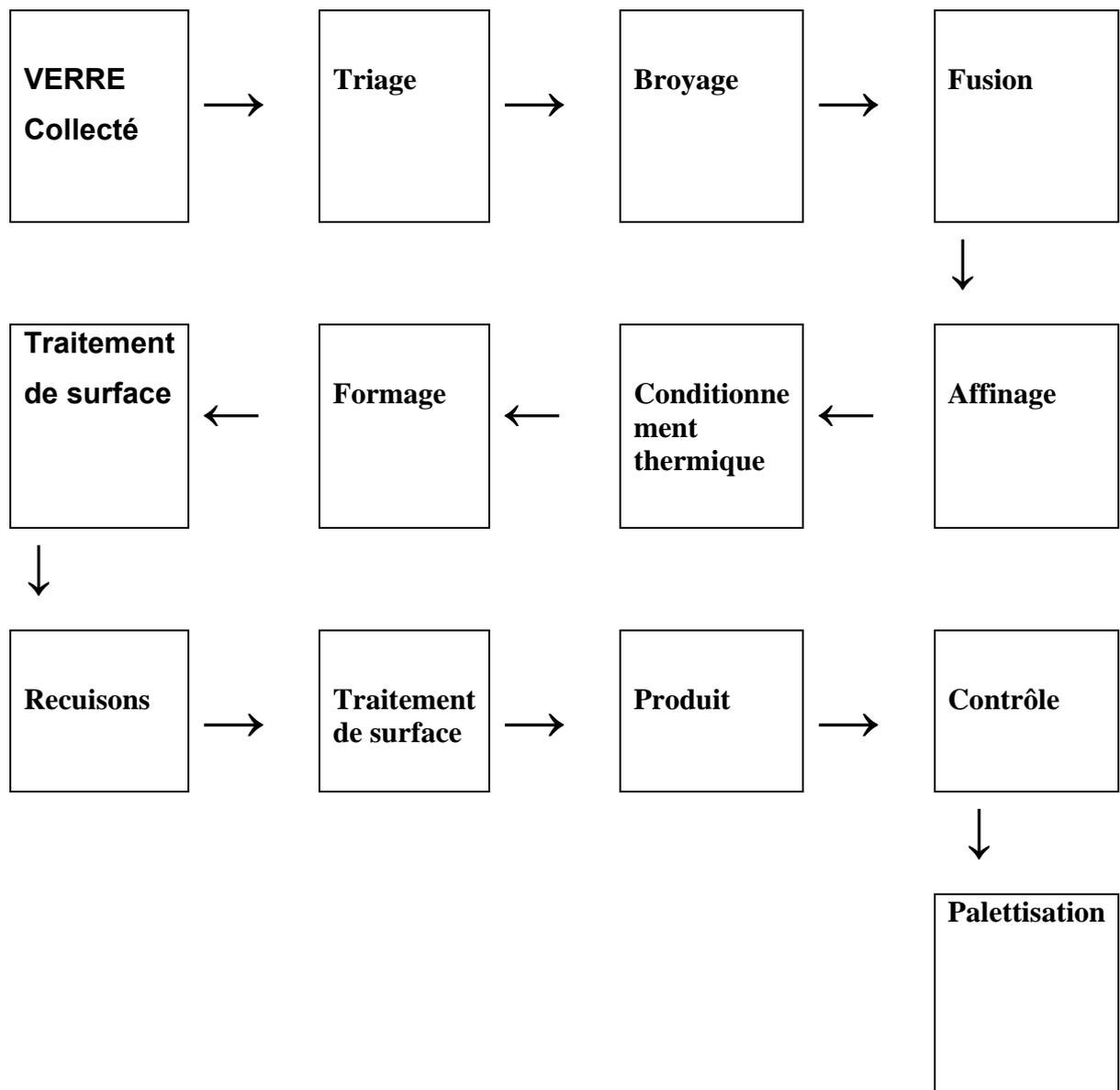
-**Palettisation** : c'est la phase de conditionnement

Ce modèle de cycle de vie définit les phases séquentielles dans lesquelles les verres d'emballage sont fabriqués pour éprouver leurs conformités avant de passer à la suivante.

Pour cela, il permet de collecter des déchets verres auprès des ménages et aux entreprises qui n'utilisent pas leurs déchets. Puis, nous avons à les trier selon leur couleur et on doit les broyer pour réduire en calcin. Après, on doit les fusionner pour être écoulé et passé à l'affinage pour enlever des déchets nuisibles à la

production, et entrer directement au conditionnement thermique pour avoir les paraisons idéales et passer dans un moule ébaucheur puis dans un moule finisseur pour avoir des emballages. Ensuite, on doit traiter la surface pour enlever les rebords et recuire pour solidifier. Enfin, on doit les contrôler pour connaître s'ils suivent la norme ou non et les palettiser c'est-à-dire les emballer selon leur forme.

Figure 32: schéma des phases de production [14]



Ce sont les grandes étapes du recyclage des emballages en verre :

ETAPE 1 : la matière première, c'est le débris du verre

La qualité du produit dépend des débris de verre issus des travaux de collecte et de triage .Par exemple : l'enlèvement des impuretés, classement par couleur

Figure 33 :Débris de verre



ETAPE 2 : L'Obtention du calcin après le broyage

Le broyeur réduit la dimension des débris de verre en poudre pour faciliter sa fusion dans le four

Figure 34 :Calcin de couleur verte et incolore

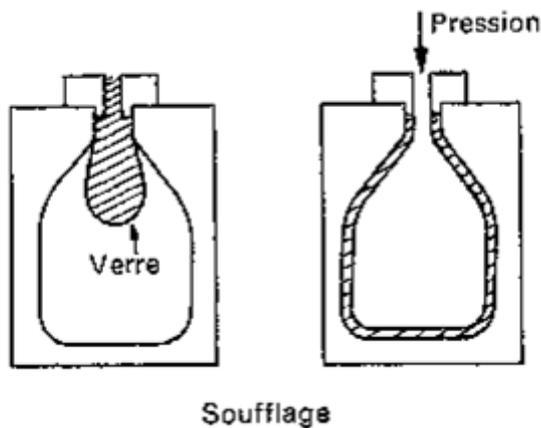


ETAPE 3 : La mise en forme du verre en fusion

Le moule en acier muni d'un système de refroidissement permet au verre de donner la forme voulue en utilisant la pression. La température correspond au domaine de mise en forme du type du verre utilisé.

Le domaine de mise en forme est donné par la figure montrant la variation de la viscosité des verres avec la température (voir **ANNEXE 2**)

Figure 35 : Mise en forme



ETAPE 4 : L'obtention des nouveaux emballages en verre

La production des nouveaux emballages en verre répond à la demande des entreprises de boissons, de produits pharmaceutiques, de produits alimentaires... Le verre, grâce à ses qualités naturelles de neutralité, de pureté, de transparence, de conservation, de valorisation et de recyclabilité, est largement utilisé et plébiscité pour une grande variété de produits (boissons et produits alimentaires, parfums et cosmétiques, pharmacie).

Ce sont des exemples de nouveaux emballages en verre issus du recyclage : bouteilles, bocal

Figure 36 :Nouveaux emballages en verre



Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES



CHAPITRE IX : ETUDE ENVIRONNEMENTALE

IX.1. AVANTAGES ENVIRONNEMENTAUX DU RECYCLAGE DU VERRE

- Le recyclage du verre est un geste qui a de nombreux bénéfices pour l'environnement. Il permet non seulement de faire des économies de matières premières, d'eau et d'énergie mais aussi de **réduire les émissions de dioxyde de carbone**. Ainsi, la substitution de 10% de matières premières dans le four verrier par du calcin fait gagner 2,5% de l'énergie nécessaire à la fusion. Une tonne de verre recyclé et refondu permet d'éviter l'émission de 500 kg de CO². La même année, le recyclage a permis d'éviter le rejet de 867.100 T équivalents carbonés.

En 2006, **1.885.000 tonnes de verre** ont été recyclées, ce qui représente une économie de :

- 1.244.000 T de sable et 188.500 T de calcaire
- 2.205.450 m³ d'eau (soit la consommation annuelle de plus de 40.000 personnes)
- 2.752.100 MWh d'énergie (soit la consommation annuelle de plus de 267.000 personnes).

A noter : en 2007, grâce aux consommateurs, le taux de recyclage du verre d'emballage s'élevait à 75%.

Par le recyclage du verre, en 2010 dans l'Union Européenne:

- Plus de **12 millions de tonnes** de matières premières (sable, carbonate de soude, calcaire) ont été économisées : c'est l'équivalent de deux pyramides égyptiennes en sable et autres matériaux.
- Plus de **7 millions de tonnes** de rejets de CO₂ ont été évités, ce qui équivaut à 4 millions de voitures sur la route parce que le verre est recyclable à 100% et à l'infini dans un système en boucle fermée, à chaque



fois qu'une bouteille ou un bocal est correctement collecté, recyclé et transformé en de nouveaux emballages, de l'énergie et des matières premières sont économisées et moins de CO₂ est émis

IX.2. NOTION SUR L'ENVIRONNEMENT

IX.2.1. définition

- Au sens large du terme, l'ENVIRONNEMENT est l'ensemble des éléments naturels et artificiels qui entoure l'être humain.
- Au sens stricte du terme, l'ENVIRONNEMENT est constitué de l'ensemble des parties du (des) milieu(x) (milieu physique et biologique) qui sont en corrélation direct avec le milieu humain.
- Au sens plutôt général, l'ENVIRONNEMENT peut être considéré comme l'ensemble de l'élément constitutif des différentes parties de notre planète.

IX.2.2. Environnement et développement

Selon la charte de l'environnement malgache (loi 90-033 du 21.12.90) : l'ensemble des milieux naturels et artificiels, y compris les milieux humains et le facteur social et culturel intéressent le développement (ce qui fait qu'environnement et développement sont interdépendant).

Par suite l'objectif principal de cette ETUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT consiste à rétablir un équilibre durable et harmonieux entre les besoins du développement de l'homme et les soucis écologique.

Notre étude consiste donc à situer le développement apporté par le sujet de mémoire par rapport à la conservation de l'environnement.

IX.2.3. Décret MECIE

Le décret MECIE n° 99-954 du 15/12/99 relatif à la **mise en compatibilité des investissements avec l'environnement** englobe l'EIE et le PREE



IX.2.4 EIE (étude d'impact environnemental)

Etude qui consiste en l'analyse scientifique et préalable des impacts potentiels prévisibles d'une activité donnée sur l'environnement, et en l'examen de l'acceptabilité de leur niveau et de mesure d'atténuation permettant d'assurer l'intégrité de l'environnement dans les limites technologiques disponibles à un coût économique acceptable.

IX.2.5 PREE (programme d'engagement environnemental)

Un programme géré par la cellule environnementale du ministère sectoriel dont relève la tutelle, qui consiste en l'engagement d'un promoteur de prendre certaines mesures d'atténuation des impacts de son activité sur l'environnement, ainsi que les mesures éventuelles de réhabilitation du lieu d'implantation. **[15]**

IX.2.6. ETUDE D'IMPACT PROPREMENT DITE

Notre étude prévisionnelle se penche donc sur le milieu humain et naturel pour l'usine de commercialisation de poudre de verre sodo-calcique

IX.2.6.1. impact sur le milieu humain

IX.2.6.1.1 Impact socio-économique du projet :

L'implantation de l'usine générera de l'emploi pour gens locaux. Puis l'usine apportera aussi des constructions en matière de développement humain et sociaux comme le terrain de foot par exemple

IX.2.6.1.2 Impact sur les infrastructures :

La construction de l'usine apportera une nouvelle image de l'urbanisme dans le site d'implantation, étant donné que les bâtiments de surface répondent aux normes d'infrastructure. La mise en bitume de la route menant au site peut être aussi appréciée.

IX.2.6.1.3 Impact par les bruits et les vibrations :

Les bruits et vibrations venant de l'usine n'ont aucun impact de grande envergure



car les bâtiments de l'usine sont équipés en isolant phonique surtout dans le bâtiment où sont effectués le concassage et le broyage.

IX.2.6.1.4 Impact par les poussières :

Les poussières venant de l'usine n'ont aucun effet notable sur les riverains car aussi l'usine comportera plusieurs épurateurs d'air pour chaque bâtiment, de plus chaque ouvrier est équipé de masque, seule l'émission de poussière est à noter pendant la phase de construction. **[15]**

IX.2.6.2. impact sur le milieu naturel

IX.2.6.2.1 Impact sur les eaux :

L'eau usée provenant de l'usine est préalablement récupérée dans un grand bassin afin d'être traitée, il est à noter que ces eaux ne comportent que de la poussière, donc aucune menace pour les eaux de ruissellement et la nappe phréatique.

IX.2.6.2.2 Impact sur l'air :

Comme énoncé déjà dans le milieu humain l'air venant de l'usine est déjà purifié de même l'usine en question ne produit aucun gaz dans l'atmosphère comme le gaz carbonique par exemple.

IX.2.6.2.3 impact sur la faune et la flore

Vu que l'usine n'émet pas des produits chimiques et des gaz toxiques, on peut dire que l'impact sur la faune et la flore est négligeable. **[15]**

IX.2.7. REJETS POLLUANTS DE L'INDUSTRIE DE VERRE

L'environnement, ce sont notamment :

- La terre, l'eau et l'air, y compris toutes les couches de l'atmosphère
- Toutes les substances organiques et inorganiques ainsi que les organismes vivants
- Les systèmes naturels en interaction qui incluent ces composantes



- Les conditions sociales, économiques et culturelles qui influencent la vie des personnes et des collectives
- Toutes constructions ou structures de fabrication humaine

D'après l'article 1 du décret 95.377 du 23 mai 1995 relatif à la **Mise en En** **Compatibilité des Investissement avec l'Environnement** (M.E.C.I.E), tout projet d'investissement qu'il soit privé ou public susceptible de porter atteinte à l'environnement doit faire l'objet d'une étude d'impact, compte tenu de la nature technique, de l'ampleur dudit projet ainsi que de la sensibilité du milieu d'implantation. Parmi les investissements soumis à l'étude d'impact environnemental figurent les investissements relatifs aux industries de verre. Conformément aux principes énoncés dans la loi n° 90.033 du 21 décembre 1990 modifiée et complétée par les lois 97.012 du 06 juin 1997 et 2004 / 015 portant charte de l'Environnement, notamment dans ses dispositions concernant les objectifs du programme d'Action Environnemental ainsi que l'impact des projets d'investissement et des actions de développement, la loi n°99.021 du 28 juillet 1999 définit le cadre général d'une politique de gestion rationnelle et de contrôle des pollution industrielle.

Toute unité industrielle est soumise à autorisation conformément aux dispositions des textes réglementaires en vigueur de la loi 99.021 du 19 Août 1999 relative à la politique de gestion et de contrôle des pollutions industrielles.

L'industrie verrière est répartie en 3 secteurs principaux de production

- le verre mécanique (verre creux, verre plat, fibre de verre,...)
- Le verre à main (gobeletterie fine,....)
- L'industrie de transformation

Tous ces secteurs engendrent la pollution de l'environnement.

Donc les modalités d'application de l'article 7 de la loi 99.021 sur la politique de gestion et de contrôle des pollutions industrielles sont nécessaires

D'une part, les problèmes liés à l'environnement sont les déchets de fabrication, ils sont généralement recyclés par retour dans le four, mais il y a une limite à la



quantité qui peut-être recyclée dans le secteur tel que le verre plat pour des raisons de qualité. La haute température à la fusion du verre génère des quantités d'oxydes d'azotes non négligeables, et des poussières qui résultent principalement des envolements et de la réaction de vapeur salcalines sur le dioxyde de soufre. On, peut voir dans les tableaux suivants les rejets polluants d'un four verrier en Kg / jour et la composition moyenne des fumées d'un four de verrerie

Tableau N°29 :Rejets polluants d'un four verrier pour un four qui produit 230tonnes de verre et consomme 31 tonnes de fioul par jour

Désignation	Poids (Kg/ jour)
Fumées	550.000
SOx	1.224
NOx	667
Poussières	95

Source :[1]

Tableau N°30:Composition moyenne des fumées pour un verre

Désignation	Pourcentage
CO ₂	14%
H ₂ O	9,6%
N ₂	71%



O ₂	5%

Source :[1]

D'autre part, l'eau usée provenant d'une industrie de verre est aussi polluante

Tableau N°31: Pollution des eaux générée par la fabrication de verre et industrie céramique

désignation	MES	MO	SELS	Toxiques	Azote	Phosphore
FABRICATION DE VERRE ou CERAMIQUE	7,9	0,8	1,7	2,5	0,7	0,6

Source :[1]

MES : matières en suspension

MO : matières organiques

D'après ces tableaux, l'opération de fabrication de verre est aussi polluante.

IX-3 LES MESURES D'ATTENUATION DES IMPACTS

Plusieurs moyens et méthodes ont été mis en œuvre pour réduire la quantité de polluants tout en respectant la qualité et le débit de la production de verre :

- Prévention et réduction à la source, déchets, eau, CO₂, émissions atmosphériques
- La mise en place d'un système de gestion des effluents liquides (épuration, régulation du PH, décantation,...) selon l'article 26 de la loi 099.021 sur la politique de gestion et de contrôle des pollutions industrielles du 28 juillet 1999
- L'utilisation du fioul à basse teneur en soufre
- Traitements spécifiques des fumées (electrofiltre, filtre à manche, ...) selon l'article 34 et 35 de la loi 099.021 sur la politique de gestion et de contrôle des pollutions industrielles du 28 juillet 1999
- Utilisation du four électrique mais cette solution n'a été retenue que pour des fours de petite capacité
- Utilisation de boosting électrique



CONCLUSION GENERALE

Au terme de cette étude, on peut conclure que l'hypothèse de la faisabilité et de la rentabilité de la mise en place d'une unité de recyclage des emballages en verre dans la zone périphérique de la capitale sont confirmés. Les études sur la technique d'exploitation et sur le marché ont montré la viabilité du projet sur le plan commercial et technique. Sur le plan technique, rien n'empêche à dire que le projet est réalisable et rentable. La bonne gestion des déchets nous permet de favoriser la valorisation des débris de verre en fabriquant des nouveaux emballages en verre comme les bouteilles.

. Nous devons veiller également à l'évolution en perpétuel de la protection de l'environnement et au développement économique du pays à partir du recyclage des déchets comme ce que les pays développés ont déjà vécu.

.
La politique de gestion des déchets présente deux avantages majeurs. Ils se manifestent principalement sur deux plans :

- Sur le plan social : elle améliore la façon de penser et la mentalité de la population pour le respect des normes d'hygiène. Elle permet une participation active de la communauté dans les diverses étapes de la gestion des déchets. Elle améliore la relation entre la municipalité et la communauté en vue d'atteindre un même objectif qui est la protection de l'environnement.
- Sur le plan économique : la gestion des déchets permet de lutter contre la pauvreté

Ce projet procure un avantage économique pour le pays grâce à sa rentabilité économique. L'objectif global est donc la valorisation des déchets à Madagascar. Ce travail nous a permis d'appréhender l'importance du recyclage du verre, aussi bien un côté environnemental que du côté économique où l'entreprise doit prendre ses responsabilités et établir des programmes de collecte et de recyclage du verre

Nous avons apporté notre contribution à cette faisabilité de recyclage du verre, plus précisément les emballages en verre qui est très abondant à



Madagascar. Pourtant, ils ne sont pas recyclés dans notre pays par l'inexistence des études effilés à ce recyclage et des matériels appropriés ; surtout les fours.

Pour ce faire, nous avons fait l'expérience de réduire la température de fusion du verre qui est de 1 300 °C à 1100°C qui est la température maximal des fours connus jusqu'à présent à Madagascar. Nous avons constaté qu'avec ajout de fondant (borax ou carbonate de sodium à 3 à 4%), le calcin provenant des emballages en verre fond à 1100°C. Nous avons aussi ajouté un stabilisant (oxyde de plomb à 7à13%). Ce stabilisant joue un rôle très important à la formation du verre. Il rend stable le produit verrier obtenu. Ce qui nous conduit aussi à un verre de type sodo-calcique qui n'est autre que la matière première des emballages en verre : bouteille, bocal,...

Lors de nos expériences, l'obtention des résultats proches des données physiques du verre (résistance à la compression :100daN/mm² ;résistance à la flexion :3daN/mm² ;dureté :6,5), nous a confirmés que la phase de production est réalisable.

Enfin, l'étude économique que nous avons faite montre que le recyclage des emballages en verre est envisageable. Plusieurs consommateurs demandent d'emballage en verre, notamment les entreprises qui produisent la confiture, les aliments, les huiles essentiels, les parfums, les boissons, les yaourts artisanales,... En effet, nous avons constaté qu'il n'y a pas de producteur des emballages en verre chez nous, alors les demandeurs les importent. A cause de cette importation, une augmentation du prix est notée à cause de la taxe douanière, le coût de transport. L'apport de valeur ajouté est alors assuré pour le recyclage de ces déchets au lieu de les regarder éparpillé.



BIBLIOGRAPHIE

1. ANDRIAMAMONJISOA TSIRY – Elaboration d'un dossier technofinancier pour la mise en place d'une unité de production verrière-mémoire d'ingénieur, Département Génie Chimique, ESPA Antananarivo, 1997,76p
2. ANDRIAMANDANJA OnySeheno »Etude de la possibilité de production du verre à Madagascar »Mémoire d' ingénieur ,Département Génie Chimique ESPA Antananarivo,2008,73p
3. ASHBY,Michael F. « Matériaux microstructure et mise en œuvre » Tome 2.DUNOD,Paris1991,385p
4. CERADEL<<produits et matériel pour la céramique et le verre>>,catalogue,France,2009, p 207
5. ERIC SAVOY, « Traite technique du verre », première édition parue le 07 avril 1989, revue et améliorée le 30 septembre 1989, Achevé d'imprimer le 28 octobre 1989 l'imprimerie André Demiere SA, centre Articom, 46, route de Divonne, 1260 Lyon, Page 301.
6. GOUABE EMADAK Patrick Bertolain « GESTION DES DECHETS A MADARAIL S.A :CAS DE LA GARE DE SOARANO »D E S S ,ESPA.UFR Sciences économiques et de gestion de Bordeaux IV.2007 – 2008,82p
7. LAFUMA.H <<Chimie appliquée aux matériaux de construction chaux et ciment, céramique et verrerie >>Masson et Cie, Editeur 120, Boulevard Saint Germain Paris Vie 1992.
8. LAROUSSE « Petit Larousse illustre », Librairie Larousse 17, rue de Montparnasse, et boulevard Raspail 114, Paris VIe 1979
9. Marlène Hutchinson. « Analyse de la perception des résidants de multilogements à Montréal à la mise en place de stratégies visant l'augmentation de leur participation à la collecte sélective ».Maitrise en



- environnement. Université de Sherbrooke. Avril 2004
10. MAURICE POSTE ; FRANCIS DURREUX, « Technique de l'ingénieur »
21 rue cassette 75006 Paris 1972.
 11. MEYER F et GRIVEE P, « La fabrication du verre », édition : Prover-paris.
 12. NAMBAVELO Dyno « Contribution à l'élaboration des medias filtrants
partir des déchets de verre de type sodo-calcique » mémoire
d'ingénieur, département Génie Chimique, ESPA Antananarivo,
2012,87p
 13. ONUDI «Le verre et sa fabrication »,1979-New York.
 14. RAHANTANIRINA Marie Anita Ony Lanto Fabienne « projet de
production et de commercialisation d'emballage en verre dans la région
d'Analamanga » mémoire de fin d'études en gestion ,sept 2011 ,103p
 15. RAKOTOARIZAFY M.S. Sitrakiniaina « contribution à l'étude techno-
économique du recyclage du verre sodo-calcique à
Madagascar »Mémoire d'ingénieur ,Département Génie Chimique
ESPA Antananarivo,2010,82p
 16. RAKOTOMANANTSOA Mamy Delphin, « étude pratique pour la
production artisanale du verre à Madagascar » mémoire de fin d'étude
pour l'obtention du diplôme d'ingénieur matériaux,2010.p114
 17. RANARIVELO Mbola Miaratiana. « L'IMPORTANCE DE LA GESTION
DES DECHETS DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT COMME
MADAGASCAR »Mémoire De Maîtrise.DEGS. Février 2005.72p
 18. RANDRIAMANANA Hajarifidy Marie H., « Contribution à l'étude d'un
procédé simple par l'obtention d'une matière vitrifiable de type de verre
de labo à partir de déchet de verrerie de labo », Mémoire d'ingénieur,
Département Génie Chimique, ESPA Antananarivo, 2000,106p.
 19. RAPANOEL Herilanto Andriamady « contribution à l'étude de fabrication
d'un réfractaire isolant »mémoire d'ingénieur, département Génie
Chimique, ESPA Antananarivo, 2009,80p



20. RASAMOELINA Tahinamandranto. « RECUPERATION ET RECYCLAGE DES CONSTITUANTS DES PILES USAGEES » (D.E.A.) en Chimie. FACULTE DES SCIENCES.87p
21. VERNIER Jean-Luc, L'environnement, Paris, PUF, 2001, Que sais-je ?, 127 pages
22. VERRE AVENIR. Communiqué de presse « L'industrie du verre d'emballage » ,25 Fevrier 2013,05p
23. XAVIER DE MIRBECK « Technique de verre » Dessain et Tobra,1992,Paris



WEBOGRAPHIE

24. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Verre> 22 /01/2014
25. <http://www.verre-avenir.fr/histoire-du-verre> 22/01/2014
26. <http://www.infovitrail.com/verre/pots.php> 04/02/2014
27. <http://www.infovitrail.com/verre/bassin.php> 04/02/2014
28. <http://www.généralité du verre.htm> 04/02/2014
29. <http://www.composition.php.htm> 15/04/2014
30. <http://www.verre-avenir.fr/lercyclage-du-verre/l-histoire-du-recyclage> 11/05/2014
31. <http://pcml.univ-lyon1.fr/texte-theses-pdf/theseCoussa.pdf> 11/05/2014
32. <http://www.verre-avenir.fr/le-recyclage-du-verre/le-traitement-du-verre-pour-le-recyclage> 06/06/2014
33. <http://www.infovitrail.com/verre/fonte.php> 06/06/2014
34. http://fr.wikipedia.org/wiki/carbonate_de_sodium 06/06/2014
35. http://www.fr.wikipedia.org/wiki/Industrie_du_verre 25/07/2014
36. <http://www.infovitrail.com/verre/recuisson.php> 02/08/2014
37. <http://www.verre-avenir.fr/Le-recyclage-du-verre/L-histoire-du-recyclage> 02/08/2014
38. <http://www.verre-avenir.fr/Le-recyclage-du-verre/Les-acteurs-du-recyclage-> 21/08/2014
39. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Borax> 26/08/2014
40. <http://www.infovitrail.com/verre/colorants.php> 26/08/2014
41. <http://www.infovitrail.com/verre/composition.php> 13/10/2014



42. <http://www.infovitrail.com/verre/proprietes.php> 20/10/2014
43. <http://www.infovitrail.com/verre/physique.php> 20/10/2014
44. http://fr.wikipedia.org/wiki/Verre_sodocalcique 11/11/2014
45. <http://www.arecpc.com/guide/dib/verre.html> 19/11/2014
46. www.saint-gobain-sekurit.com/fr/glazingcatalouge/propriétés-du-verre 24/11/2014

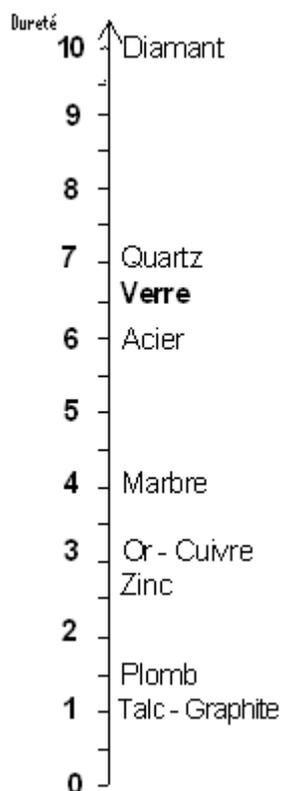


ANNEXES

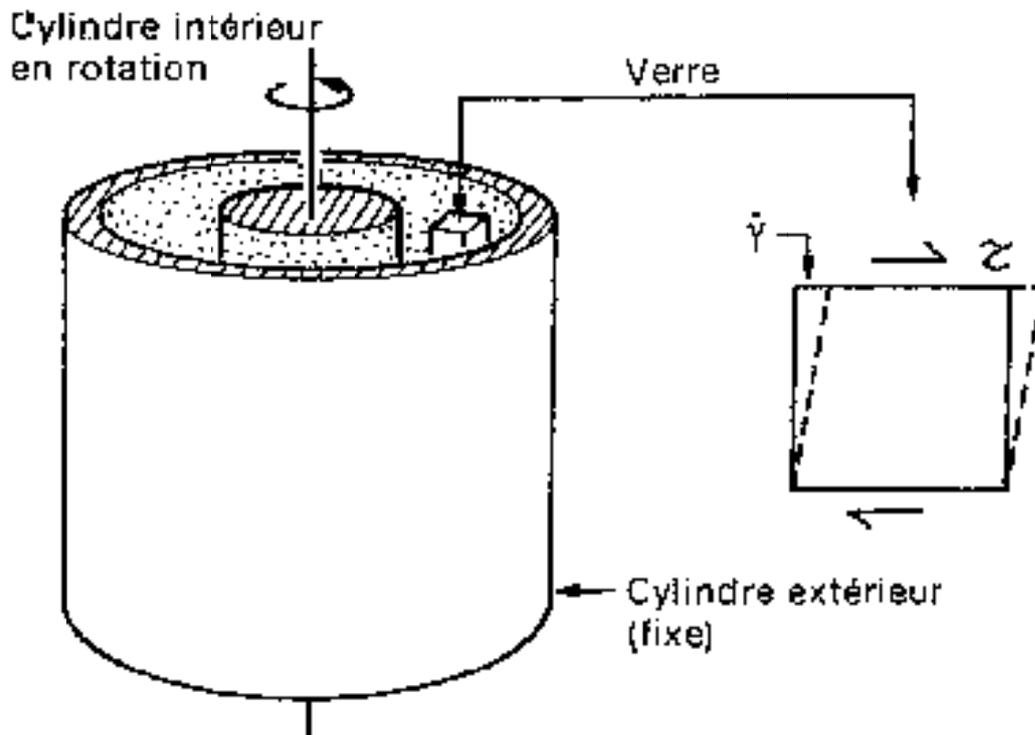


ANNEXE 1: DURETE DES MATERIAUX COURANTS SELON L'ECHELLE DE MOHS[3]

- Dureté du talc : 1
- Dureté du graphite : 1
- Dureté du plomb : 1,5
- Dureté du zinc : 2,5
- Dureté de l'or : 3
- Dureté du cuivre : 3
- Dureté du marbre : 4
- Dureté de l'acier : 6
- Dureté du verre : 6,5**
- Dureté du quartz : 7
- Dureté du diamant : 10



ANNEXE 2: VARIATION DE LA VISCOSITE DES VERRES AVEC LA TEMPERATURE[10]

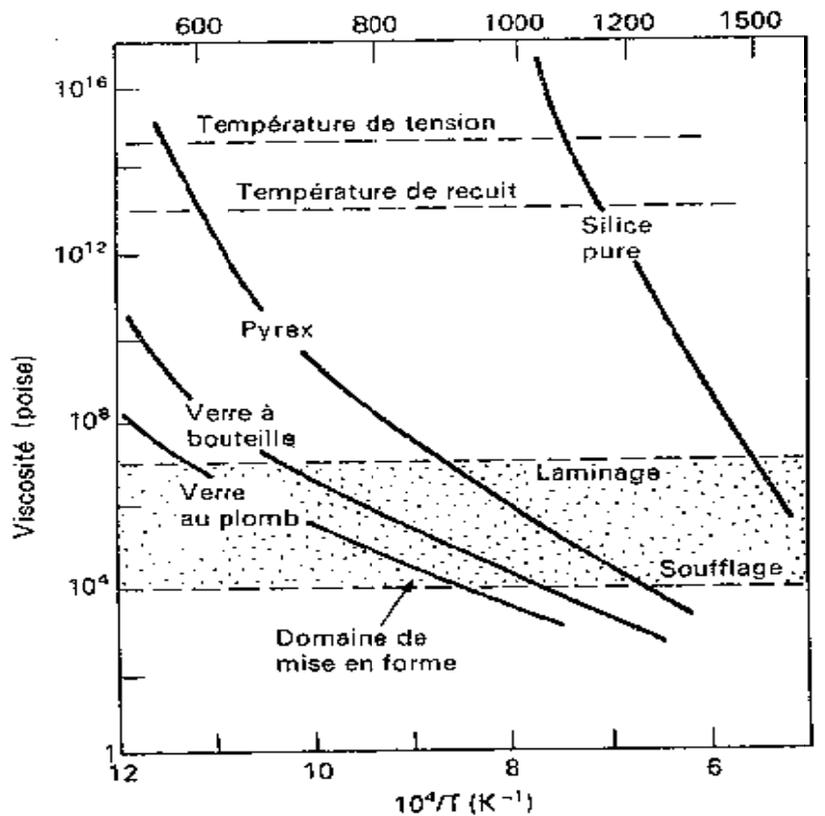


Viscosimetre rotatif

La viscosité des verres est déterminée à l'aide d'un viscosimètre rotatif (voir figure). Si une contrainte de cisaillement (MPa) est appliquée au verre, celui-ci se déforme avec la vitesse $\dot{\gamma}$ (s^{-1}). La viscosité, dans son unité usuelle la poise (P ou 0,1Pa.s) est définie par :

$$\eta = \frac{\tau}{10\dot{\gamma}}$$

Les verres sont travaillés dans la gamme de températures où leur viscosité est comprise entre 10^4 et 10^7 poises (voir figure)



Variation de la viscosité des verres avec la température

Cette figure montre comment la viscosité de trois types de verre et celle de la silice elle-même varient avec la température. Dans ce diagramme, $\log \eta$ est reporté en fonction de $1/T$. La gamme des viscosités correspondant aux températures de travail est située dans la bande grisée



ANNEXE 3: ANALYSE PHYSICO - CHIMIQUE[15]

1) Détermination de la perte au feu : P_E

La perte au feu englobe l'eau de constitution des minéraux, les matières organiques, et les gaz carboniques des carbonates alcalino-terreux.

Sa détermination se fait par calcination de l'échantillon ; la différence de poids avant et après calcination donne la valeur de la perte au feu.

Matériel :

1 creuset en porcelaine.

1 four à moufle à 900°C.

1 balance analytique.

1 dessiccateur.

P_E (prise d'essai) : 1,5g d'échantillon de matière à analyser.

Mode opératoire :

Mettre le creuset dans le four à 900 °C pendant 30 minutes et refroidir dans le dessiccateur pendant 20 min. Soit M_C la masse du creuset.

Mettre dans le creuset la masse de la P_E 1,5g. Peser la masse initiale (P_E + creuset) : M_1 , avant calcination.

Mettre l'ensemble (P_E + creuset) dans le four à 900 °C pendant 4 h et refroidir dans le dessiccateur pendant 20min. Peser la masse finale (P_E + creuset) : M_2 après calcination.

$$\%P_f = [(M_1 - M_2) / (M_1 - M_C)] \times 100$$

2) Détermination du taux d'humidité : H

Principe : taux d'humidité = teneur en eau.



Matériels :

1 creuset en porcelaine.

1 étuve réglée à 110°C.

1 balance analytique.

1 dessiccateur.

Prise d'essai (P_E) : 0,5g d'échantillon de matière à analyser.

Mode opératoire :

Séchage du creuset dans l'étuve à 110°C pendant 30 mn et refroidissement dans le dessiccateur pendant 20mn. Peser la masse du creuset : M_C .

Mettre dans le creuset la masse 0,5g de la P_E . Peser la masse initiale (P_E + creuset) : M_1 .

Sécher l'ensemble dans l'étuve à 110°C pendant 4h. Refroidir dans le dessiccateur pendant 20mn.

Peser la masse finale (creuset + P_E) : M_2 .

$$\%P_f = [(M_1 - M_2) / (M_1 - M_C)] \times 100$$

$$= (\text{volume du vide} / \text{Volume total}) \times 100$$



ANNEXE 4 : ANALYSE CHIMIQUE[15]

But : Obtenir un filtrat F contenant Fe, Al, Mg, Ti, Ca, Ni et un résidu R contenant de la silice.

Mode opératoire :

- _ Attaquer dans un bêcher 1g d'échantillon avec 60ml de mélange triacide ;
- _ Chauffer progressivement jusqu'à fumé blanc, puis reprendre par l'HCl 10% (environ 50 ml) ;
- _ Filtrer, laver à l'HCl 10% puis à l'eau bouillante et on obtient :
 - Le filtrat F contenant du Fe, Al, Mg, Ti, Ca, Ni ;
 - Le résidu R qui contient la silice.

1. Détermination du pourcentage de SiO₂ :

- Prise : résidu R
- Mettre ce résidu dans un creuset de platine déjà taré de poids M₁ ;
- Mettre dans un four à 1 000°C, pendant au moins 2h 30mn, le creuset contenant le résidu ;
- Peser le, et soit M₂ son poids ;
- Calcul : **%SiO₂ = (M₂ – M₁) 100%**

2. Détermination du pourcentage d'Al₂O₃ :

- Prise : 100ml de filtrat F dans un bêcher ;
- Ajouter 30ml de précipitant ;
- Chauffer le mélange jusqu'à l'entrée en ébullition ;
- Placer ensuite le bêcher contenant le mélange dans un bain marie bouillant ;
- Pour séparer le précipité de Al (C₉ H₆ O)₃, ajouter goutte à goutte à la solution, une solution de 2N de CH₃COONH₄ ;
- Laisser reposer la solution avec le précipité pendant 10 à 15mn dans le bain marie ;
- Filtrer ensuite à travers un creuset filtrant en verre futé préalablement lavé ;
- Sécher à 130°C jusqu'à poids constant.
- Lors de la précipitation, il se produit la réaction :



- Calcul : soit m la masse de Al (C₉H₆NO)₃ obtenue à partir de 100ml de filtrat :

$$\text{\%Al}_2\text{O}_3 = 0,11 \times m \times F\%$$



3. Détermination du pourcentage de Fe₂O₃ :

- Prendre 100ml de filtrat de la solution mère ;
- Diluer jusqu'à 200ml avec de l'eau distillée ;
- Agiter le mélange ;
- Prélever 20ml de cette solution diluée, et à l'aide d'une burette contenant de NH₄OH (50%), verser goutte à goutte jusqu'au virage (pH = 4) ;
- Ajouter rapidement 20ml de HCl 0,1N ;
- Calcul : soit V en ml le volume versé de permanganate :

$$\%Fe_2O_3 = 400 \cdot 10^{-3} \cdot V$$

4. Détermination du pourcentage de TiO₂ :

Pour la détermination du %TiO₂, on utilise le résultat du dosage de Fe₂O₃ et Al₂O₃, on a :

$$\% Al_2O_3 = \% (Fe_2O_3 + Al_2O_3 + TiO_2) - \% (Fe_2O_3 + TiO_2)$$

5. Détermination du pourcentage de CaO :

- Prise : filtrat F ;
- Chauffer le filtrat F jusqu'au début d'ébullition ;
- Ajouter 15ml de NH₄Cl 10% plus quelques gouttes de bleu de bromothymol, précipiter par l'ammoniaque concentré et puis filtrer ;
- On obtient le filtrat F' qui contient Ca²⁺ et Mg²⁺ et un résidu R' qui contient le dépôt de Fe³⁺, Ti⁴⁺, Al³⁺ ;
- On reprend le résidu R' avec 100ml d'eau + HCl concentré et on ajoute 15ml de NH₄Cl à 10% et quelques gouttes de bleu de bromothymol ;
- Précipiter avec l'ammoniaque concentré jusqu'au virage de l'indicateur coloré et puis filtrer ;
- On obtient le filtrat F'' qui contient Mg²⁺, Ca²⁺ et un résidu R'' qui contient Fe³⁺, Ti⁴⁺ et Al³⁺ ;
- Réunir les filtrats F' et F'' dans un même bûcher et acidifier avec HCl concentré jusqu'à une teinte jaune ;
- Chauffer jusqu'à 70 à 80°C et ajouter 25ml de solution d'oxalate d'ammonium saturée ;
- Précipiter avec l'ammoniaque concentrée et laisser reposer une nuit avant de le filtrer et on a R''' ;



- Le mélange de F' et F'' contient Mg^{2+} et le résidu R''' contient le dépôt deprecipité de Ca^{2+} ;
- Reprendre le résidu R''' avec H_2SO_4 10% et avec de l'eau distillée et on ajoute 10ml de H_2SO_4 concentré et chauffer à 70 à 80°C ;
- On a dosé à chaud la solution avec $KMnO_4$ à 0,1N ;
- Résultat : **V** = volume de $KMnO_4$ trouvé en ml ;

$$\%CaO = 0,56V$$

6. Détermination du pourcentage de MgO :

- Prise : mélange de filtrat F' et F'' ;
- Acidifier le mélange avec HCl concentré jusqu'à une coloration jaune clair et ajouter 25ml de phosphate d'ammonium à 10% ;
- Précipiter à froid avec l'ammoniaque concentré et laisser reposer une nuit et puis filtrer ;
- Prendre le résidu solide précipité de MgO ;
- Tarer et calciner un creuset porcelaine et soit **M** le poids trouvé ;
- Mettre le creuset dans un four à 1 000°C et peser. Et on a **M'** ;

$$\%MgO = 0,07244 (M' - M)$$

TABLE DES MATIERES

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des annexes

Liste des lexiques

INTRODUCTION GENERALE

PREMIERE PARTIE : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LE VERRE

I.1. HISTORIQUE.....	3
I.1.1. La découverte.....	3
I.1.2. Le verre plat soufflé : V ^{ème} et le X ^{ème} siècle.....	3
I.1.3. Le verre à vitre.....	4
I.1.4.A Madagascar.....	4
I.2. FABRICATION DU VERRE.....	5
I.2.1. Matériaux pour la fabrication du verre.....	5
I.2.2. Différents types de fours.....	5
I.2.2.1. Les fours à pots.....	5
I.2.2.2. Les fours à bassin.....	7
I.2.3. Procédés de fabrication.....	8
I.2.3.1. Le procédé FOURCAULT.....	8
I.2.3.2 Le procédé LIBBEY-OWENS.....	9
I.2.3.3 Le procédé PITTSBURGH.....	10
I.3. TYPES DE VERRE.....	11
I.3.1. LES VERRES SODO-CALCIQUES.....	11
I.3.2. LES VERRES BORO-SILICATES.....	11
I.3.3. LES VERRES AU PLOMB.....	12
I.3.4. LE VERRE DE SILICE.....	12
I.3.5. FIBRES DE VERRE.....	12
I.3.6. FIBRES OPTIQUES.....	13
I.4. COMPOSITION DU VERRE.....	14
I.4.1. Les oxydes formateurs (les vitrifiants).....	15
I.4.2. Les oxydes modificateurs.....	15
I.4.2.1.Les fondants : (oxydes alcalins).....	15
I.4.2.2.Les stabilisants : (oxydes alcalino-terreux).....	16
I.4.2.3.Les colorants :.....	16
I.4.2.4.Décolorants.....	17
I.5. PROPRIETES PHYSIQUES DU VERRE.....	18
I.6. PROPRIETES CHIMIQUE DU VERRE.....	20
CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATIERESPREMIERES	
II.1. ANALYSE CHIMIQUE.....	21
II.1.1. Principe.....	21
II.1.2. Mise en solution des solides.....	21
II.1.3. Dilution des filtrats.....	22
II.2. SPECTROSCOPIE RAMAN.....	22

II.3. SPECTROSCOPIE D'ABSORPTION DES RAYON X.....	23
II.4. DIFRACTION DES RAYONS X.....	23
II.4-1 Principe.....	23
II.4.1.1. Méthode des poudres DEBYE SCHERRER.....	24
II.4.1.2. Méthode des agrégats orientés.....	25
II.4.2. Utilité.....	26
II.5. ANALYSE THERMIQUE DIFFERENTIELLE(ATD).....	26
II.5.1. Principe.....	26
II.5.2. Utilité.....	27
II.6. GRANULOMETRIE.....	27
II.6.1. Principe.....	27
II.6.2. Utilité.....	.28
II.7. DILATATION.....	28
II.7.1. Principe	28
II.7.2. Utilité.....	28
II.8. MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE.....	28
II.8.1. Principe	28
II.8.2. Utilité	29
II.9. MASSE VOLUMIQUE APPARENTE.....	29
II.9.1. Principe	29
II.9.2. Utilité.....	29
II.10. RETRAIT AU SECHAGE.....	29
II.10 .1. Principe.....	29
II.10 .2. Utilité.....	29
II.11. RETRAIT.....	30
II.11.1. Principe.....	30
II.11.2. Utilité.....	30
II.12. PLASTICITE.....	30
II.12.1. Principe.....	30
II.12.2. Utilité.....	30
II.13. CONDUCTIVITE THERMIQUE	30
II.13.1.Principe.....	30
II.13.1.1. Méthode statistique.....	31
II.13.1.2. Méthode dynamique.....	31
II.13.2. Utilité.....	31
II.14. RESISTANCE A LA COMPRESSION	31
II.14.1. Principe.....	31
II.14.2. Utilité.....	32
CHAPITRE III : LE RECYCLAGE DU VERRE	
III.1. HISTORIQUE.....	33
III.2. MATIERE PREMIERE : LE CALCIN	33
III.3. DIFFERENTES ETAPES DU RECYCLAGE DU VERRE.....	33
III.3.1. Le triage	34
III.3.1.1. Triage par les consommateurs.....	34
III.3.1.2. Triage au centre de traitement.....	35
III.3.2. Le broyage.....	36
III.3.3.L'enfournement	36
III.3.3.1. La fusion (800°à1400°C).....	36
III.3.3.2. L'affinage (1450°à1530°C).....	36
III.3.3.3. Le conditionnement thermique (1530°C à 1000°C).	36

III.3.4. La fabrication de nouvelles bouteilles	37
---	----

DEUXIEME PARTIE : ETUDES EXPERIMENTALES

CHAPITRE IV : MATIERES PREMIERES

IV.1. la collecte et le triage des débris de verre.....	39
IV.2. Le concassage et le broyage.....	39
IV.3. Le tamisage	40
IV.4. La composition chimique du calcin.....	42
IV.5. Les fondants utilisés.....	42
IV.5.1. Le carbonate de sodium	42
IV.5.2. Le borax.....	45
IV.6. Le stabilisant utilisé.....	48

CHAPITRE V : LES ETAPES DES TRAVAUX DE RECYCLAGE DU VERRE

V.1. PREPARATION DES ECHANTILLONS.....	50
V.2. LA CUISSON	51
V.2.1. Matériels utilisés.....	51
V.2.2 Variation de température lors de la cuisson.....	53
V.3 Résultats.....	53
V.3.1. Test de résistance à la compression.....	54
V.3.1.1. But.....	54
V.3.1.2. Principe.....	54
V.3.1.3. Expression des résultats.....	56
V.3.1.4. Résultat de la résistance à la compression..	57
V.3.1.5. Interprétation.....	58
V.3.1.6. Conclusion.....	58
V.3.2. Test de résistance à la flexion.....	58
V.3.2.1. But.....	58
V.3.2.2. Principe.....	59
V.3.2.3. Expression des résultats.....	60
V.3.2.4. Résultat de la résistance à la flexion.....	60
V.3.2.5. Interprétations.....	60
V.3.2.6. Conclusion.....	61
V.3.3. Test de dureté.....	62
V.3.3.1. But.....	62
V.3.3.2. Principe.....	62
V.3.3.3. Echelle de Mohs.....	62
V.3.3.4. Résultat de la dureté.....	62
V.3.3.5. Interprétation.....	63
V.3.3.6. Conclusion.....	64
V.4. Conclusion.....	64

TROISIEME PARTIE : ETUDES SOCIO-ECONOMIQUES DU PROJET

CHAPITRE VI: CONTEXTES DU PROJET

VI.1. GESTION DE DECHETS.....	65
-------------------------------	----

VI.1.1. Objectifs de la gestion des déchets.....	65
VI.1.2. Organes de gestion des déchets.....	66
VI.2. IMPORTATION DE VERRE.....	67
VI.3. PRODUCTION MONDIALE DE VERRE.....	69
VI.4. RECYCLAGE DU VERRE DANS LES PAYS DEVELOPPES...	70
VI.4.1. UNION EUROPEENNE.....	70
VI.4.2. Normandie - France.....	72
VI.4.3. Au Japon.....	72

CHAPITRE VII: ETUDE FINANCIERE DE L'USINE

VII.1. LIEU D'IMPLANTATION.....	73
VII.2. BATIMENTS.....	73
VII.3. COUT DE CONSTRUCTION.....	73
VII.4. COUT DES MATERIELS ET DES CAMIONS.....	74
VII.5. COUT TOTAL DES INVESTISSEMENTS.....	74
VII.6. LE FRAIS DE DEMARRAGE.....	75
VII.7. L'AMORTISSEMENT.....	76
VII.8. LA CHARGE FIXE.....	77
VII.9. LE COUT OPERATOIRE.....	77
VII.10. LECHIFFRE D'AFFAIRE ANNUEL.....	77
VII.11. MARGE SUR COUT VARIABLE – SEUIL DE RENTABILITE	78
VII.12. RENTABILITE.....	79
VII.13. Evaluation du projet.....	79

CHAPITRE VIII : ETUDE TECHNIQUE DE REALISATION

VIII.1. Le recyclage.....	81
VIII.2. Méthode de production.....	81

CHAPITRE IX : ETUDE ENVIRONNEMENTALE

IX.1. AVANTAGES ENVIRONNEMENTAUX DU RECYCLAGE DU VERRE	
IX.2. NOTION SUR L'ENVIRONNEMENT.....	88
IX.2.1. définition.....	88
IX.2.2. Environnement et développement.....	88
IX.2.3. décret MECIE.....	88
IX.2.4. EIE (étude d'impact environnemental).....	89
IX.2.5 PREE (programme d'engagement environnemental).....	89
IX.2.6 ETUDE D'IMPACT PROPREMENT DITE.....	89
IX.2.6.1. impact sur le milieu humain.....	89
IX.2.6.2. impact sur le milieu naturel.....	90
IX.2.7. REJETS POLLUANTS DE L'INDUSTRIE DE VERRE	90

IX-3 LES MESURES D'ATTENUATION DES IMPACTS.....	93
---	----

CONCLUSION GENERALE.....	94
--------------------------	----

Bibliographie.....	96
--------------------	----

Webographie.....	99
------------------	----

Annexe

Table des matières