

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : CONSTRUCTION MECANIQUE

Présenté par :

Gherabi Houssef Eddine et Saadi Hatem

Thème

ETUDE ET ELABORATION D'UN PROCESSUS DE RECYCLAGE DE VERRE

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
BENARIOUA Younes	Professeur	Président
ZEMMAMOUCHE Redouane	MCB	Encadreur
ZEGGANE Hauari	MCB	Examineur

Année Universitaire : 2023 / 2024

N° d'ordre : GM/...../2024

DEDICACE

Je dédie du fond du cœur ce modeste travail à :

*Mes très chers parents et je leurs dit merci pour
tous ce que vous aviez fait pour moi. . .*

*Mes très chers frères , ma petit sœur Zamar et
Ma belle cat. . .*

*Mes très chers amis de promotion «construction»
et mes amis des expériences de la vie. . . .*

Housseem eddine gherabi

DEDICACE

Je dédie ce travail :

A. . .

Tous ma famille. . .

*Tous mes collègues les ingénieurs et mes amis dans
l'Algérie, Tunisie, et la France. . .*

*Tous mes professeurs et tous ceux qui m'ont un jour
enseigné un mot. . .*

*A eux tous, je souhaite un avenir plein de joie, de
bonheur et de succès. . .*

Saadi Hatem

REMERCIEMENTS

الحمد والشكر لله سبحانه وتعالى الذي منحنا الشجاعة والصبر لإتمام هذا العمل المتواضع.

نعبر عن امتناننا العميق للأستاذ زماموش رضوان، الذي بذل جهودًا عظيمة، وقدم لنا نصائح قيمة، وأبدى صبرًا ومناورة في المتابعة والتوجيه.

كما نتوجه بالشكر والتقدير إلى جميع أساتذتنا الأفاضل الذين زودونا بأسس العلم والمعرفة، وكانوا الركيزة الأساسية في بناء مسيرتنا التعليمية.

نتقدم ببالغ الشكر والامتنان لأعضاء لجنة المناقشة على قبولهم الانضمام إلى لجنة، وتكريسهم وقتهم وجهدهم لتقسيم هذا العمل.

وفي الختام، نتوجه بالشكر إلى كل من ساهم بشكل مباشر أو غير مباشر في إنجاز هذا العمل المتواضع. لكم منا كل الامتنان والتقدير.

ملخص

تُرَكز هذه الأطروحة على دراسة شاملة لإعادة تدوير الزجاج في الجزائر، مع التركيز على المُشكلات والتحديات التي تواجه هذه القطاع. تُقدم الأطروحة اقتراحات لإصلاح هذه المُشكلات، مثل إنشاء مراكز متخصصة لفرز وإعادة تدوير الزجاج، مع تحديد التجهيزات اللازمة لإعادة تدوير الزجاج بشكل فعال. تُناقش الأطروحة أيضًا توافر الزجاج القابل لإعادة التدوير في الجزائر، وتُقدم وصفًا لخطوات إنتاج الزجاج. تُقدم الأطروحة دراسة للسوق التسويقي لإعادة تدوير الزجاج، مع التركيز على المنافسة والشركات الوطنية التي تُمارس إعادة تدوير الزجاج.

الكلمات المفتاحية:

زجاج عائم، التحول الزجاجي، أكسيد السليسيوم، المزيج الزجاجي.

Abstract

This thesis provides a comprehensive study on glass recycling in Algeria, focusing on the problems and challenges facing the sector. The thesis proposes solutions to address these problems, such as establishing specialized centers for sorting and recycling glass, while identifying the equipment required for effective recycling. It also analyzes the availability of recyclable glass in Algeria and describes the steps involved in glass production. Furthermore, the thesis presents a market study for the marketing of recycled glass, focusing on competition and national companies that practice glass recycling.

Keywords:

Float glass, vitreous transition, silicon dioxide, mixture glassy.

Résumé

Cette thèse propose une étude complète sur le recyclage du verre en Algérie, en mettant l'accent sur les problèmes et les défis auxquels ce secteur est confronté. La thèse propose des solutions pour remédier à ces problèmes, telles que la création de centres spécialisés pour le tri et le recyclage du verre, tout en précisant les équipements nécessaires pour un recyclage efficace. Elle analyse également la disponibilité du verre recyclable en Algérie et décrit les étapes de production du verre. En outre, la thèse présente une étude de marché pour la commercialisation du verre recyclé, en se concentrant sur la concurrence et les entreprises nationales qui pratiquent le recyclage du verre.

Mots de clés :

Verre Float, transition vitreuse, oxyde de silicium, mélange vitrifiable.

Sommaire

Liste des figures	VIII
Listes des tableaux	IX
Introduction générale.....	1
Chapitre I.....	4
I.1. Introduction :	4
I.2. Histoire du Verre :	4
I.3. Historique du développement de fabrication du verre en Algérie :.....	5
I.4. Définition du Verre :.....	6
I.5. Structure du verre :	7
I.5.1. Oxydes formateurs (formateurs de réseau) :	7
I.5.2. Oxydes modificateurs (modificateurs de réseau) :.....	7
I.5.3. Oxydes intermédiaires :.....	7
I.6. Transition vitreuse :	8
I.7. Composition du verre :	10
I.7.1. Exemple d'une composition de verre :.....	11
I.8. Fabrication du Verre :.....	11
I.8.1. Matières Premières :.....	12
I.8.2. Processus de fabrication :.....	13
I.9. Les Propriétés du Verre :	14
I.9.1. Propriétés rhéologiques :.....	14
I.9.2. Propriétés physiques :.....	16
I.9.3. Les propriétés thermiques :	17
I.9.4. Propriétés chimiques :.....	18
I.10. Les Différents Types de Verre :.....	18
I.10.1. Verre naturel :.....	18

I.10.2. Verre artificiel :	19
Chapitre II.	25
II.1. Introduction	25
II.2. Définition du recyclage :	25
II.3. Le verre récupéré : le calcin	26
II.4. Exploitation des domaines liés au verre recyclé en Algérie :.....	27
II.4.1. Le Context Algérien:.....	27
II.4.2. Domaines d'application du verre recyclé :.....	27
II.4.3. Les défis du recyclage du verre en Algérie :.....	28
II.5. Proposition d'une nouvelle idée pour l'exploitation du verre recyclé.....	28
II.5.1. La Valorisation du verre recyclé dans les travaux publics.....	28
II.5.2. Les déchets de verre dans la production du ciment et béton :.....	29
II.5.3. L'utilisation des déchets de verre comme remplacement de ciment :.....	30
II.6. Conclusion:.....	31
Chapitre III.	33
III.1. Introduction:.....	33
III.2. Proposition d'un processus de recyclage du verre :	33
III.2.1. Pré tri :	33
III.2.2. Collecte :.....	33
III.2.3. Tri et conditionnement :	33
III.2.4. Domaines de recyclage des déchets de verre :	34
III.3. Installations Necessaires:	35
III.4. Disponibilité et quantification des verres à recycler :.....	35
III.5. Procédes d'élaboration des verres :.....	37
III.5.1. Traitement du sable :	37
III.5.2. L'atelier de composition (enfournement) :.....	39
III.5.3. Cuve de fusion :.....	41

III.5.4. Fabrication (Formage):.....	43
III.6. Conclusion :	46
Chapitre IV.....	48
IV.1. Effectuer l'étude de marché d'une entreprise de recyclage du verre :.....	48
IV.2. Comment analyser le marché du recyclage du verre ?	49
IV.3. Comment analyser la demande pour une entreprise de recyclage du verre?	49
IV.3.1. Un échantillon représentatif pour l'entreprise de recyclage du verre :.....	49
IV.3.2. Le questionnaire qualitatif et le questionnaire quantitatif pour l'étude de marché d'une entreprise de recyclage du verre :	49
IV.3.3. Les segments de marché et les profils des clients pour l'entreprise de recyclage.	50
IV.3.4. La taille et la valeur du marché de l'entreprise de recyclage :	50
IV.4. Comment analyser "l'offre" dans l'étude de marché d'une entreprise de recyclage du verre ?	51
IV.4.1. Comment rédiger l'étude concurrentielle d'une entreprise de recyclage du verre ?	51
IV.4.2. Les éléments de succès et les avantages concurrentiels d'une entreprise de recyclage du verre :	51
IV.5. Comment analyser les partenaires dans l'étude de marché d'une entreprise de recyclage du verre ?.....	52
IV.6. Comment bien conclure l'étude de marché d'une entreprise de recyclage du verre ?.	52
IV.6.1. Les 4P du Marketing pour une entreprise de recyclage :	52
IV.7. Choisir un marché cible :	53
IV.8. Choisir un emplacement :	53
IV.9. Marché national :	54
IV.9.1. Société MFG :.....	54
IV.9.2. Société AFRICAVER :.....	55
IV.9.3. Société COMAVER :	55
IV.9.4. Société NOVER :.....	56

IV.9.5. Société ALVER :	57
Conclusion générale :	61
Références bibliographiques	31

Liste des figures

Figure I.1 : Verre à l'époque des pharaons.....	5
Figure I.2 : Substitution de deux molécules SiO_2 par une molécule Al_2O_3 dans la structure d'un verre de silicate (l'introduction de deux Al fait disparaître deux oxygènes non pontant).	8
Figure II.1 : Calcin.....	26
Figure II.2 : L'application actuelle et potentielle de produits en béton avec le verre dans la construction.....	30
Figure II.3 : Les étapes de recyclage des déchets de verre en des matériaux cimentaires et granulaires.	31
Figure III.1 : Les étapes de collecte du verre.....	34
Figure III.2 : composition déchets ménagers en Algérie.....	36
Figure III.3 : Une ligne de fabrication de verre d'emballage.....	37
Figure III.4 : Traitement du sable	38
Figure III.5 : Schéma d'enfournement du verre	40
Figure III.6 : Salle de contrôle du four de fusion	41
Figure III.7 : Exemple du verre plat.....	42
Figure III.8 : Exemple du verre creux.....	42
Figure III.9 : Formage du verre dans une machine IS.....	44
Figure III.10 : Recuisons des produits en verre	45
Figure III.11 : L'emballage de produit fini.....	46

Listes des tableaux

Tableau I.1 : Compositions chimiques de quelques verres industriels	11
Tableau I.2 : Recette du verre cité précédemment pour la fabrication de Bouteilles de boissons	13
Tableau I.3 : Points fixes de viscosité.....	15
Tableau II.1 : La composition chimique du ciment et des différents verres colorés.....	29
Tableau III.1 : Quantité des déchets produits par habitant (d'après rapport sur l'État de l'environnement en Algérie MATE 2005.	35
Tableau III.2 : quantités des principaux déchets recyclables.	36
Tableau III.3 : Les matières premières et leurs intérêts à la verrerie	40

Introduction générale

Introduction générale

Le recyclage du verre est devenu une composante essentielle de la gestion des déchets modernes en raison de ses nombreux avantages environnementaux et économiques. Le verre, matériau 100% recyclable sans perte de qualité, peut être recyclé à l'infini, ce qui en fait un candidat idéal pour les initiatives visant à réduire la consommation de ressources naturelles, les émissions de CO₂ et l'empreinte écologique globale. La production de verre neuf nécessite des matières premières comme le sable de silice, le carbonate de sodium et le calcaire, ainsi qu'une quantité significative d'énergie pour la fusion. En recyclant le verre, on conserve ces matières premières et on réduit la consommation d'énergie, puisque la refonte du verre recyclé nécessite moins de chaleur que la production à partir de matières premières vierges. Le recyclage diminue également le volume de déchets envoyés en décharge, réduisant ainsi la pression sur les sites de décharge et les impacts environnementaux associés. Cette étude vise à concevoir un processus optimisé de recyclage du verre en analysant les technologies actuelles, en identifiant les défis techniques et économiques, et en proposant des solutions innovantes pour améliorer l'efficacité et la viabilité du processus. En adoptant une approche multidisciplinaire intégrant des analyses théoriques, expérimentales et économiques, les résultats attendus devraient apporter des contributions significatives à l'industrie et aux politiques environnementales, tout en promouvant un développement durable. L'objectif principal est de concevoir et d'élaborer un processus de recyclage du verre optimisé, en tenant compte des aspects techniques, économiques et environnementaux. Pour atteindre cet objectif, il est crucial d'analyser les différentes étapes du processus de recyclage, d'identifier les défis et les opportunités associés, et de proposer des solutions innovantes pour améliorer l'efficacité et la viabilité du processus. En conclusion, cette étude vise à fournir une base scientifique et technique solide pour le développement de processus de recyclage du verre plus efficaces et durables, avec des implications potentielles pour les industries de la gestion des déchets, de la fabrication de verre et des politiques environnementales.

Dans le premier chapitre, on va discuter l'histoire du verre, sa fabrication et ses propriétés. On explore l'évolution du verre en Algérie et on décrit les différentes étapes de sa production, notamment les matières premières utilisées et les procédés de fabrication. De plus, on analyse les propriétés physiques, chimiques et rhéologiques du verre, ainsi que sa classification en verre naturel et artificiel. Les différents types de verres artificiels, avec leurs applications spécifiques, sont également abordés.

Dans le deuxième chapitre, on se penche sur le recyclage du verre en Algérie et on explore les défis et opportunités liés à ce domaine. On présente le concept du "calcin" et on analyse la situation

actuelle du recyclage du verre en Algérie, en soulignant les domaines d'application et les difficultés rencontrées. Le chapitre propose ensuite une nouvelle idée d'exploitation du verre recyclé : son utilisation dans les travaux publics, notamment dans les remblais routiers et les structures en béton. L'utilisation des déchets de verre comme remplaçant du ciment est également examinée.

Dans le troisième chapitre, on propose un processus de recyclage du verre en Algérie. On décrit les différentes étapes, de la collecte et du tri à la transformation du verre en calcin. Les installations nécessaires, les équipements et la quantité de verre à recycler sont également analysés. Le chapitre explore ensuite les procédés d'élaboration du verre, de la préparation du sable à la fabrication des produits finis, tels que le verre plat et le verre creux.

Dans le quatrième chapitre, on se concentre sur l'étude du marché pour commercialiser le verre recyclé. On fournit des conseils pour analyser le marché, identifier la demande, les concurrents et les partenaires. La méthodologie pour réaliser une étude de marché est présentée, incluant la création d'un échantillon représentatif, l'utilisation de questionnaires et la segmentation du marché. Le chapitre analyse ensuite le "Mix Marketing" pour une entreprise de recyclage du verre, en se basant sur les 4P du marketing. Enfin, on discute du choix d'un marché cible et d'un emplacement optimal, tout en présentant les principales entreprises nationales qui utilisent le calcin comme matière première.

Chapitre I

Le verre (définition, type de
verre, fabrication de verre

Chapitre I.

I.1. Introduction :

Le matériau verre possède des propriétés qui autorisent des applications dans des domaines de grande diffusion (vitrage...) jusqu'à des applications à très forte valeur ajoutée (bijouterie, optique de précision).

Le verre est utilisé essentiellement en optique pour ses propriétés réfringentes (lentilles, vitres, verres de lunettes).

Il est également utilisé en chimie et dans l'industrie agroalimentaire : il réagit très peu avec la plupart des composés utilisés dans ces domaines, c'est donc un matériau idéal pour les contenants (bouteilles, pots de yaourt, béciers, colonne de distillation, éprouvettes, tubes à essai...). Un des seuls liquides ayant le pouvoir de dissoudre le verre est l'acide fluorhydrique (HF).

Le verre est le matériau dans lequel sont confinés les déchets nucléaires de haute activité (HAVL).

Le verre est aussi un matériau de construction très important dans l'architecture moderne et dans l'industrie automobile. Il est notamment présent sous forme de laine de verre, isolant léger, imputrescible et ininflammable. [1].

I.2. Histoire du Verre :

Le verre est la plus étonnante création de l'homme. Il a été inventé à l'âge de Bronze, bien que la nature l'ait créé depuis fort longtemps avec les verres issus des roches volcaniques. La localisation de la première production est encore indéterminée entre la Mésopotamie, l'Égypte et la Syrie. La découverte de ce matériau reste liée à des opérations de métallurgie ou de céramique. Les plus anciens verres découverts ont des compositions similaires à ceux d'aujourd'hui.

Ces verres n'étaient pas transparents mais opaques et colorés par des métaux tels que le cuivre, le cobalt, le fer, l'antimoine ou l'étain. Ces métaux donnent une coloration rouge ou bleu-rouge pour le cuivre, bleu pour le cobalt, noir, vert-brun pour le fer, jaune pour l'antimoine et blanc pour l'étain. Mais l'identification de ces colorants n'a été faite qu'à une époque proche.

Le mot verre représente à la fois une matière, à vocation artistique ou technologique, et des objets, articles ménagers ou composants pour l'industrie. Le verre fait partie de notre vie quotidienne. Ses applications, innombrables, sont en perpétuelle évolution. Il est tellement présent autour de nous qu'on ne le remarque pas. Le verre est probablement la matière synthétique la plus ancienne de

l'humanité. Considérée autrefois comme une activité stratégique, la fabrication du verre, longtemps constituée d'une suite de tours de main, était traditionnellement tenue secrète. Depuis un siècle environ les technologies verrières ont abandonné l'empirisme et se sont renouvelées. La structure du verre est devenue, comme celle du cristal, un sujet d'étude pour les physiciens du solide [2].



Figure I.1 : Verre à l'époque des pharaons.

I.3. Historique du développement de fabrication du verre en Algérie :

L'industrie du verre en Algérie a connu une évolution significative depuis la pose de la première pierre de la verrerie de l'Afrique du Nord le 8 novembre 1942. Face à la pénurie de verre durant la Seconde Guerre mondiale, les services de production de l'époque ont soutenu la poursuite de la construction de l'usine, qui est entrée en service en 1947 avec l'acquisition de trois machines "LYNCH" en provenance des verreries métropolitaines en France. Le premier four a été allumé le 19 janvier 1947, et vingt jours plus tard, la première bouteille était fabriquée, marquant l'inauguration officielle le 19 avril 1947.

Depuis sa création, l'usine, qui s'étend actuellement sur 17 hectares, n'a cessé de subir des modifications et des extensions pour répondre aux exigences croissantes du marché. Entre 1963 et 1971, la production de verre creux est passée de 5344 tonnes à 15588 tonnes, atteignant un pic de 16005 tonnes en 1966. En 1968, la Société Nationale des Industries du Verre (SNIV) a été créée, bien qu'elle ait été dissoute par la suite. En mai 1973, après la dissolution de la SNIV, l'usine a été rattachée à la Société Nationale des Industries Chimiques (SNIC).

La restructuration de la SNIC en 1983 a donné naissance à l'Entreprise Nationale des Verres et Abrasifs (ENAVA). En 1997, la filiale ALVER a été créée suite à une nouvelle restructuration de

l'ENAVA, gérant un complexe unique comprenant une unité de verre creux, une unité de verre plat (remplacée en 2003 par une unité de production de silicate de soude) et une unité logistique et de maintenance. En juin 2011, la privatisation totale de l'usine sous le nom de Verallia ALVER a eu lieu avec l'arrivée de Saint-Gobain. Enfin, en mai 2018, la société a été rachetée par le groupe Condor, devenant ainsi Alver Spa Groupe Condor, marquant une nouvelle ère de développement et de modernisation pour l'industrie du verre en Algérie [3].

I.4. Définition du Verre :

C'est dans les années 1980 que Zarzycki propose la définition du verre désormais adoptée : « Le verre est un solide non cristallin présentant le phénomène de transition vitreuse ». La notion de solide non cristallin est ici importante.

Le mot verre peut prendre des significations variées. Si dans le langage courant ce terme sert à désigner un matériau fragile et transparent, bien connu depuis l'antiquité, dans le langage scientifique sa portée est plus vaste mais aussi plus difficile à définir avec précision. Donc, pour définir un verre, on a le choix entre une définition opérationnelle et une définition structurale.

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

Définition structurale du verre : « Le verre est un solide non cristallin ». Suivant cette voie, les termes : « solide non cristallin », « solide amorphe » et « verre » sont synonymes. En réalité, ni l'une ni l'autre de ces définitions n'est pleinement satisfaisante. La définition structurale bien que simple en apparence est très générale. Si le verre est bien un solide non cristallin, tout solide non cristallin n'est pas nécessairement un verre. C'est le cas des gels, qui peuvent parfois conduire à des verres par un traitement approprié.

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

Les verres classiques sont caractérisés par une absence de cristallinité, et par leur faculté de passer progressivement et réversiblement à un état de plus en plus fluide lorsqu'on élève la température. Au cours de ce passage, on assiste à une modification des propriétés qui traduisent ce que l'on appelle la transition vitreuse. L'état physique correspondant et appelé état vitreux. Cette propriété est fondamentale dans les applications techniques [2].

I.5. Structure du verre :

I.5.1. Oxydes formateurs (formateurs de réseau) :

L'oxyde de silicium SiO_2 est le meilleur oxyde formateur dans l'industrie verrière, car il se trouve abondamment dans la nature sous forme de sable (quartz). Ces composés ayant des caractéristiques covalentes, tels qu'oxydes ou sulfures de silicium, de bore, de phosphore ou de germanium...

Les sables utilisés dans l'industrie verrière contiennent plus de 99% de SiO_2 avec un taux d'impuretés inférieur à 0,2% [2].

I.5.2. Oxydes modificateurs (modificateurs de réseau) :

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

Les compositions sont essentiellement à base de carbonate de sodium. Une partie de Na_2O est introduite sous forme de sulfate : le sulfate de sodium se décompose à haute température libérant des bulles de SO_2 qui facilitent l'affinage. Le nitrate NO_3 est ajouté pour ses propriétés oxydantes. K_2O , plus cher, est utilisé dans les verres au plomb « cristal » et certains verres colorés.

La chaux CaO est un composant important qui assure la stabilité des verres courants. Elle est introduite sous forme de carbonate de calcium, les calcaires, ou associée à la magnésie MgO dans la dolomie [2].

I.5.3. Oxydes intermédiaires :

Il existe une autre catégorie d'oxydes entre les formateurs et les modificateurs dont la fonction est moins nettement définis et qui peuvent jouer, selon la composition du verre, le rôle de formateur ou de modificateur. On les appelle oxydes intermédiaires. Un exemple est constitué par BeO , MgO et ZnO .

S'il y a peu d'ions alcalins dans le verre, Be^{2+} , Mg^{2+} et Zn^{2+} jouent le rôle d'ions modificateurs en créant deux oxygènes non-pontant. En revanche, s'il y a suffisamment d'ions alcalins, Be^{2+} , Mg^{2+} et Zn^{2+} peuvent se placer en position tétraédrique, l'équilibre des valences étant apporté par deux ions alcalins voisins. BeO , MgO et ZnO jouent alors le rôle de formateurs de réseau.

La présence des alcalins a une influence analogue sur le rôle joué par Al_2O_3 . Quand il est seul cet oxyde ne vitrifie pas. Introduit dans la silice pure, Al^{3+} adopte la coordinence 6, inapte à la formation d'un réseau vitreux. Al_2O_3 joue alors le rôle de modificateur. Mais lorsque Al_2O_3 est introduit dans un verre contenant des alcalins, il devient possible à Al^{3+} de se substituer à Si^{4+} dans le réseau si, à son voisinage, se trouve un Na^+ qui compense la charge négative excédentaire (Figure I.2). Chaque Al_2O_3 introduit fait disparaître la paire d'oxygènes non-pontant qui était associée aux deux ions sodium [2].

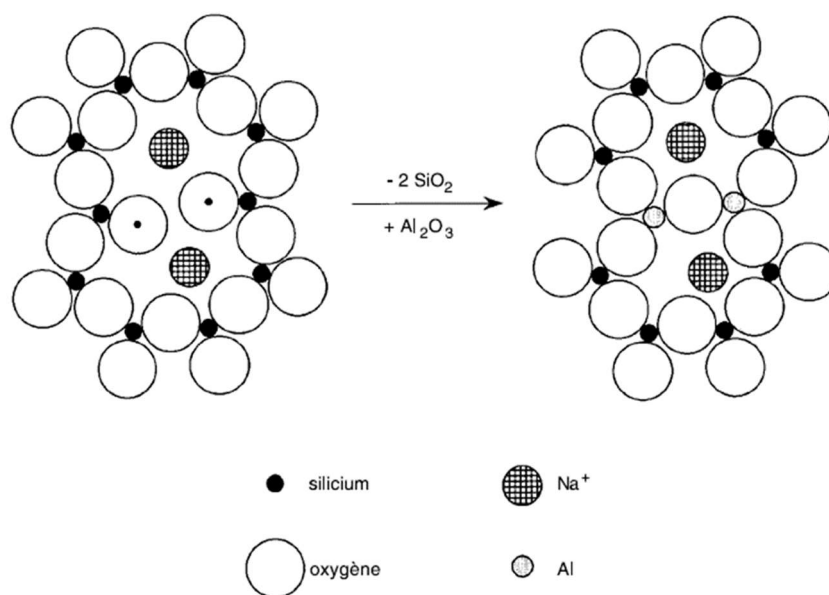


Figure I.2 : Substitution de deux molécules SiO_2 par une molécule Al_2O_3 dans la structure d'un verre de silicate (l'introduction de deux Al fait disparaître deux oxygènes non pontant).

I.6. Transition vitreuse :

La manière classique de produire un verre consiste à refroidir un liquide suffisamment rapidement pour que la cristallisation n'ait pas le temps de se produire. Le comportement thermique du verre peut être décrit par l'évolution de variables thermodynamiques telles que le volume spécifique ou l'enthalpie en fonction de la température.

Lors du refroidissement, un liquide peut se trouver à une température inférieure à la température de fusion (T_f) dans un état métastable de surfusion. Pour certains d'entre eux, cet état de surfusion peut s'établir sur un grand intervalle de température.

La figure I.3 permet de comprendre la formation d'un verre. Partant de la phase liquide haute température, le volume molaire V_m (ou l'enthalpie H) décroît avec la température. A une

température inférieure à la température de fusion, pour un traitement de durée infinie, le liquide sera transformé en un cristal dont le volume molaire (ou l'enthalpie) est bien plus faible que celui du liquide surfondu correspondant. Cependant, si le refroidissement est continu et rapide depuis l'état liquide stable jusqu'à très basse température, le liquide passe dans un domaine de température où il se trouve dans un état de surfusion. C'est cet état métastable qui va progressivement se figer pour donner naissance au verre à température ambiante. Le passage continu du liquide surfondu au verre est appelé domaine de transition. La température de transition vitreuse T_g est définie comme l'intersection des courbes extrapolées à partir du liquide et du verre. Ce domaine s'étend sur un intervalle de température dépendant de la nature du verre et de la vitesse de refroidissement. Plus la vitesse de refroidissement est élevée et plus la transformation s'effectue à haute température.

L'inverse est vrai pour un refroidissement lent (figure I.3 b).

La variation du volume molaire du verre en fonction de la température est continue et pratiquement linéaire. Ainsi, le coefficient de dilatation thermique linéique est quasiment constant. C'est là une des propriétés du verre. A température ambiante (figure I.3 a), le verre présente un volume molaire supérieur à celui du cristal correspondant. Sa structure ouverte facilite la diffusion des espèces chimiques de faible taille [12].

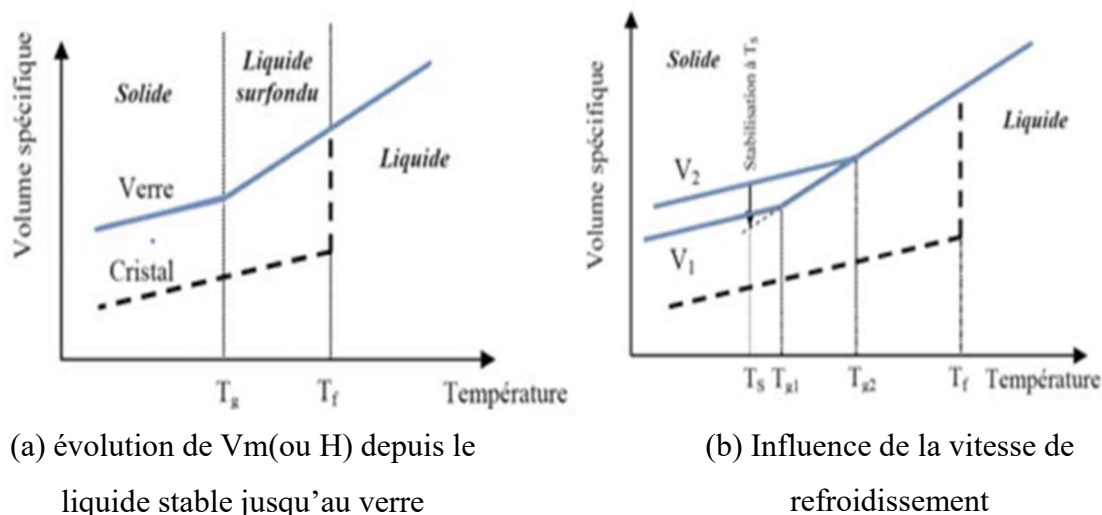


Figure I.3 : Phénomène de transition vitreuse (a) et (b).

Le verre est dans un état métastable ou hors équilibre. Il se distingue du cristal par deux aspects essentiels : Un aspect thermodynamique caractérisé par un excès d'énergie et un aspect

géométrique caractérisé par une absence d'ordre à longue distance, même s'il apparaît toutefois une conservation de l'ordre à courte portée.

En revenant au problème de la définition de l'état vitreux, on peut alors redéfinir le verre : « Le verre est un solide non cristallin caractérisé par le phénomène de transition [12].

I.7. Composition du verre :

Le verre est un matériau inorganique, composé de nombreux oxydes, mais le plus souvent élaboré à partir de 03 constituants de base :

- **L'oxyde de silicium** (SiO_2) ou silice, élément majoritaire, et véritable formateur du réseau vitreux.
- **L'oxyde de sodium** (Na_2O), appelé fondant, provenant de la décomposition de carbonates synthétiques et qui va transformer la silice en silicate par attaque chimique
- **L'oxyde de calcium** (CaO), appelé stabilisant, issu de la décomposition de CaCO_3 .

Pour de nombreux verres industriels (verre d'emballage et verre plat) ces 03 éléments représentent environ 95 % de leur composition pondérale, ce qui permet de définir le verre sur un plan chimique comme un silicate de sodium et de calcium. En réalité l'oxyde de sodium est souvent accompagné d'oxyde de potassium (K_2O), et l'oxyde de calcium par l'oxyde de magnésium (MgO). D'autres éléments, appelés additifs, sont ajoutés au verre pour apporter des propriétés bien spécifiques en fonction des applications envisagées :

- **L'oxyde d'aluminium** pour accroître la résistance hydrolytique.
- **L'oxyde de plomb** pour accroître la densité l'indice de réfraction et la brillance du verre
- **L'oxyde de bore** B_2O_3 formateur de réseau, comme la silice, mais apportant une plus grande stabilité thermique.
- **Les oxydes métalliques** des éléments de transition (Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , CaO , CuO , etc.) et certains lanthanides (CeO_2 , Nd_2O_3 ...) pour colorer le verre ou le décolorer.

Des additifs d'oxydo-réduction pour ajuster le pouvoir redox du bain de fusion, ce paramètre jouant un rôle important sur la transmission du verre dans l'infrarouge et sur sa teinte finale ; les plus utilisés sont le carbone pour son pouvoir réducteur, et l'oxyde de soufre (SO_3) obtenu par décomposition de sulfate de sodium, pour son pouvoir oxydant. À titre d'exemple voici les compositions chimiques (en poids %) d'un verre courant utiliser pour la fabrication de bouteilles, du verre cristal pour la fabrication d'objets de luxe et d'un verre borosilicate très résistant chimiquement et thermiquement pour la pharmacie [28].

Tableau I.1 : Compositions chimiques de quelques verres industriels .

	Verre de bouteilles	Verre cristal	Verre borosilicate pharmaceutique
SiO ₂	72	59.6	74.8
Al ₂ O ₃	1.7		6.2
Fe ₂ O ₃	0.3		
Cr ₂ O ₃	0.2		
CaO	11	1.3	0.5
BaO			
MgO	1		
ZnO			
Na ₂ O	13.2	3.3	7.5
K ₂ O	0.4	10.9	0.8
B ₂ O ₃			10.5
PbO		24.4	

I.7.1. Exemple d'une composition de verre :

La grande majorité des verres industriels ont des compositions très semblables et rentrent dans la définition de verre sodo-calcique. Le verre sodo-calcique est généralement composé :

- De 71 à 75 % de dioxyde de silice, SiO₂, principalement extrait du sable,
- De 12 à 16 % d'oxyde de sodium Na₂O contenu dans le carbonate de sodium Na₂CO₃,
- De 10 à 15 % d'oxyde de calcium, CaO contenu dans le calcaire – CaCO₃
- Et de petites quantités d'autres composants, destinés à conférer au verre des propriétés spécifiques.

Dans certaines compositions, un certain pourcentage d'oxyde de calcium ou d'oxyde de sodium est remplacé, respectivement, par de l'oxyde de magnésium, MgO, et de l'oxyde de potassium, K₂O. Des compositions plus détaillées de certains types de verre.

Le verre sodo-calcique ne convient généralement pas aux applications avec des changements de température brusques ou extrêmes [2].

I.8. Fabrication du Verre :

Le verre peut être produit à partir de matière minérale vierge (silice) ou de verre broyé de récupération (calcin). La fabrication du verre comporte quatre étapes. En premier lieu, les matériaux bruts sont fondus, ensuite le verre en fusion est raffiné afin d'obtenir l'homogénéité, il est alors façonné, et enfin passe au procédé d'anéantissement pour éliminer des stresses développés

pendant le façonnement. Pour des verres particuliers, des étapes supplémentaires sont parfois appliquées, comme le durcissement et la décoloration. La majorité de ces étapes sont effectuées, aujourd'hui, à la machine [4].



Figure I.4 : Sable (Silice).

I.8.1. Matières Premières :

Pour incorporer tous ces éléments constitutifs, l'industrie du verre dispose de nombreuses matières premières, la plupart d'origine naturelle, et certaines d'origine synthétique :

- Le sable de carrière est la source essentielle de SiO_2
- Le carbonate de sodium, fabriqué par le procédé Solvay (réaction chimique entre le chlorure de sodium et un carbonate de calcium), est l'apport de Na_2O
- Le calcaire, carbonate de calcium et la dolomie, carbonate mixte de magnésium et de calcium, apportent respectivement les oxydes CaO et MgO
- Des minéraux, les feldspaths, la néphéline et une roche, la phonolite, tous silicates alcalins d'alumine, naturels, sont utilisés comme source d' Al_2O_3
- Le sulfate de sodium, est la source de SO_3 , donc l'agent oxydant
- Les laitiers, des silicates de fer et de calcium produits par les hauts fourneaux, apportent le caractère réducteur, tout comme le charbon utilisé de préférence dans les verres de qualité
- La chromite, oxyde naturel de chrome et de fer est un des colorants très utilisés pour les verres verts.

Ainsi, à titre d'exemple, voici la recette (ou lit de fusion) du verre cité précédemment pour la fabrication de Bouteilles de boissons [5].

Tableau I.2 : Recette du verre cité précédemment pour la fabrication de Bouteilles de boissons

Fonctions	Matières premières	Pour élaborer 1000 kg de verre teinté boissons
Formateur de réseau	Sable	686 kg
Fondant	Carbonate de sodium	213 kg
Stabilisant	Calcaire	188 kg
	Phonolite	46 kg
Affinant	Laitier	26 kg
	Sulfate de soude	10 kg
Colorant	Chromite de fer	7 kg
Total		1176 kg

I.8.2. Processus de fabrication :

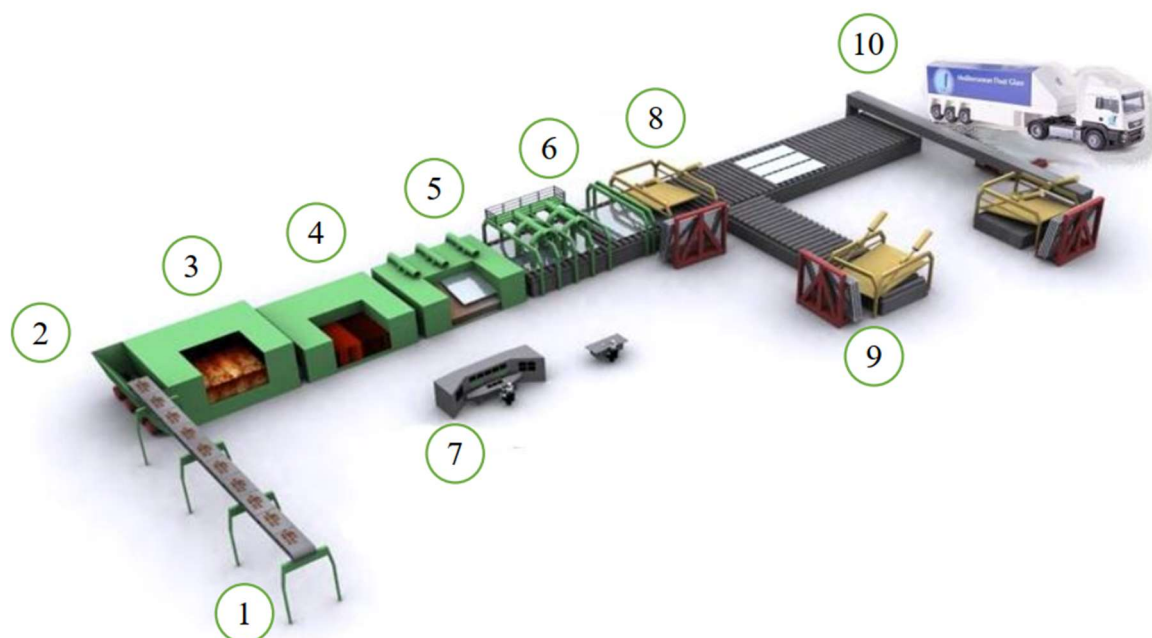


Figure I.5 : Processus de production du verre .

- 1. Préparation de la matière première :** Un contrôle rigoureux est assuré pour chaque matière première avant son enfournement selon des standards internationaux reconnus.
- 2. Préparation du mélange vérifiable :** Composé de toutes les matières premières entrantes dans la fabrication du verre float.
- 3. L'enfournement :** L'introduction du mélange vérifiable dans le four de fusion. Ce four fonctionne sous une grande température.
- 4. Four de fusion :** Le four, construit en briques réfractaires, peut contenir jusqu'à 2000 tonnes de verre fondu à 1550°C.

- 5. Bain d'étain :** Le verre float sur un bain d'étain en fusion, des roues dentées situés sur les bords du ruban propulsent le verre vers l'avant et définissent l'épaisseur requise.
- 6. Etenderie :** L'étenderie permet au ruban de verre de se refroidir dans des conditions soigneusement contrôlées. Ce processus libère les tensions internes du verre et maximise son potentiel en termes de résistance mécanique.
- 7. Salle de contrôle :** Le suivi de toute la ligne se fait à ce niveau, via la détection des défauts en automatique, le contrôle des épaisseurs et des contraintes de verre ainsi que l'optimisation des différents formats de verre.
- 8. Système de découpe :** Sert à découper le verre en différentes dimensions selon les formats voulus.
- 9. Releveuses à ventouses :** Ce système permet d'empiler directement les plateaux de verre sur des supports afin qu'ils puissent ensuite être stockés et expédiés.
- 10. Livraison du verre :** La remorque, équipée de suspensions spéciales et disposant d'une conception spécifique, reçoit le pupitre chargé de plateaux de verres (27 tonnes). L'ensemble est maintenu en position à l'aide de bras articulés ou de coussins d'air [6].

I.9. Les Propriétés du Verre :

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

I.9.1. Propriétés rhéologiques :

➤ Viscosité :

La viscosité peut être définie comme le frottement interne des liquides. Elle est mesurée en poise, le poise étant la viscosité dynamique d'un liquide opposant une résistance d'une dyne au glissement dans son plan d'une surface plane d'un centimètre carré, avec un gradient de vitesse d'un centimètre par seconde et par centimètre.

Elle est désignée, par la lettre grecque η . Son inverse, utilisé dans certains calculs, est la fluidité.

La viscosité est la caractéristique la plus importante des verres. Sa connaissance est indispensable à leur élaboration et à leur utilisation. Elle conditionne, en particulier, tous les procédés de façonnage (voir figure I.6) [7].

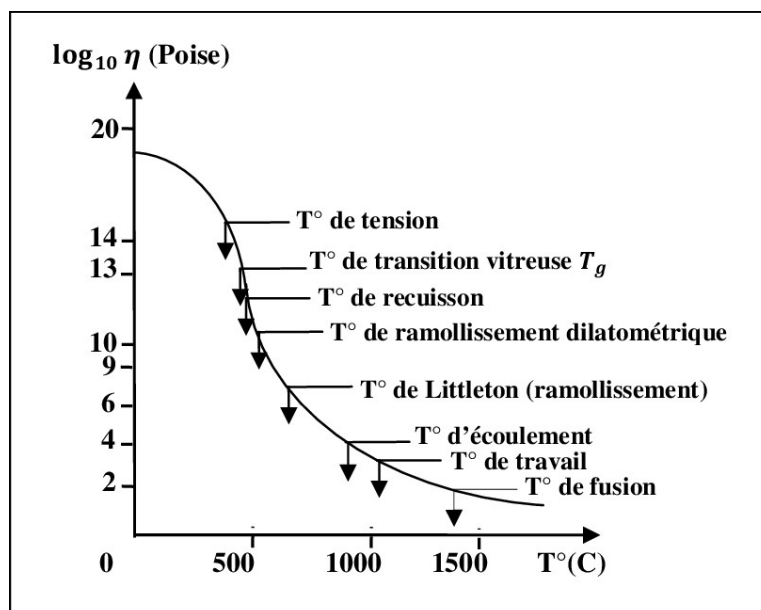


Figure I.6 : Variation de la viscosité d'un verre silico-sodo-calcique en fonction de la température.

Tableau I.3 : Points fixes de viscosité.

Points Fixes	$\log \eta$. (η . en Pa.s)	Opération technique
Température de fusion	1	Fusion et affinage
Température de travail	3	Cueilage, moulage, étirage, laminage, soudure
Température de ramollissement	6,65	Soufflage (Littleton)
Température de ramollissement dilatométrique (point R)	10	Sortie de moule
Point de recuit	12	Début de recuisons
Point S (Transition vitreuse: T_g)	12	Début de recuisons
Point de tension	13,5	Fin de recuisons
Point I	15	Fin de recuisons

➤ **La tension superficielle :**

Au sein d'un liquide ou d'un solide isotrope, l'ensemble des forces de liaison auxquelles est soumis un atome ont une résultante nulle alors que celles qui agissent sur un atome situé à la surface libre ont une résultante f non nulle dirigée vers l'intérieur.

Par conséquent pour accroître l'aire de la surface libre il faut fournir un travail pour transférer les atomes de l'intérieur vers la surface, en s'opposant à la force f . On admet que si la surface libre d'un système thermodynamique augmente de dA , son énergie libre augmente de :

$$dW = \sigma \cdot dA.$$

Le facteur de proportionnalité σ entre le travail dépensé et l'accroissement de la surface se nomme « énergie de surface » ou « tension superficielle » et s'exprime en $J \cdot m^{-2}$ [7].

I.9.2. Propriétés physiques :

➤ **La transparence :**

Le verre peut être opaque ou opalescent.

- **Dureté :** La dureté d'un matériau est définie comme la résistance mécanique qu'un matériau oppose à la pénétration d'un poinçon. Par exemple une bille en acier trempé (dureté brinell) ou une pyramide en diamant (dureté Vickers) Vis-à-vis la dureté le verre se divise en deux grands types :

Les verres durs : des verres à faibles coefficients de dilatation thermique qui se ramollissent à température élevée.

Les verres tendres à coefficient de dilatation élevé qui se ramollissent à une température relativement basse [8].

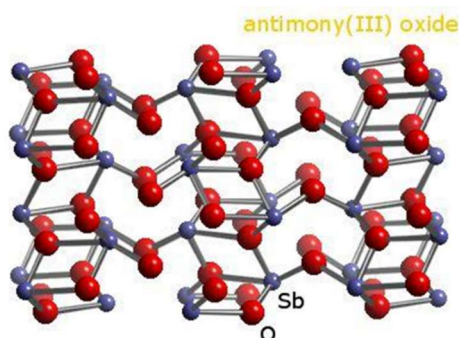


Figure I.7 : Structure cristalline de l'oxyde d'antimoine Sb_2O_3 .

- **La densité :** Elle dépend des composants, elle est d'environ 2.5g/cm^3 . 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 2.5kg.
- **La résistance d'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 ; La vitesse maximale de fissuration du verre V_m est définie par l'expression suivante [8].

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

Avec :

E : module de Young.

ρ : la masse volumique.

I.9.3. Les propriétés thermiques :

- **La dilatation :**

Elle s'exprime par un coefficient mesurant l'allongement par unité de longueur pour une variation de 1°C .

Coefficient de dilatation linéaire du verre : $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ Ainsi un vitrage de 2m de longueur s'échauffant de 30°C , s'allongera de 0.54 mm

Le verre se brise s'il subit un brusque changement de température car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas au même temps [8].

- **La chaleur spécifique :**

La quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un kelvin la température de l'unité de masse d'une substance.

Coefficient de dilatation linéaire du verre : $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ signifie qu'une plaque de verre flotte d'un mètre de long soumise à une augmentation de température de 100°C se dilate de 0.9mm. Pour l'aluminium, la valeur analogue serait de 2.4 mm, ce coefficient varie selon la composition [9].

➤ **La conductivité :**

Le verre est un mauvais conducteur (environ 500 fois moins que le cuivre), c'est un isolant électrique et aussi acoustique ceci ce n'est pas le cas à chaud car il devient conducteur a 250 °C [8].

I.9.4. Propriétés chimiques :

Le verre est un matériau présentant une très grande inertie chimique. Il n'est attaqué que par l'acide fluorhydrique ou quelques produits fortement alcalins.

Les eaux de ruissellement de béton sont de ces points de vue particulièrement dommageables pour les vitrages [8].

- Le feu n'a aucune action chimique sur le verre.
- Il est incombustible.
- Il n'est pas décomposé.
- Il n'est pas oxydé.

I.10. Les Différents Types de Verre :

Les verres varient selon leurs compositions qui sont ajustées en fonction de l'usage auquel elles sont destinées, en tenant compte à la fois des performances obtenue set des prix de revient. On distingue, selon le domaine d'applications, plusieurs grandes familles :

I.10.1. Verre naturel :

Des substances à l'état vitreux existent rarement dans la nature se sont essentiellement les verres volcaniques ou la vitrification survient lorsque la lave fondue arrive à la surface de la croûte terrestre et y subit un brusque refroidissement. Parmi ces verres on peut citer par exemple les Obsidiennes et les Pechstein [12].



Figure I.8: L'obsidienne.

I.10.2. Verre artificiel :

Bien que des substances très variées puissent former des verres, seul un nombre restreint de ceux-ci ont acquis une importance pratique. Dans ce qui suit, nous citons les principaux types de verres, leurs caractérisations principales et leurs domaines d'utilisation [12].

I.10.2.1. Les verres sodo-calciques :

La famille dont l'usage est le plus répandu est la famille sodo-calcique. Actuellement, elle représente plus de 90 % des verres produits. La prédominance permanente de cette famille est naturellement liée aux raisons économiques : faible coût des matières premières et température modérée d'élaboration [10].

Dans une composition verrière, le rôle des oxydes alcalins est de former avec la silice des silicates à bas point de fusion. Mais les silicates alcalins ont un grave inconvénient : ils sont solubles dans l'eau. Les silicates de calcium sont bien moins fusibles mais, en revanche, ils ont l'avantage de ne pas être solubles.

La baisse de la température de liquidus est d'un double intérêt pratique : d'une part la température de fusion est abaissée, d'autre part on peut refroidir la fonte jusqu'à ce qu'elle ait la viscosité convenable pour le formage, sans risquer la cristallisation. Il faut prendre garde de ne pas trop réduire la teneur de CaO de façon à limiter la solubilité du verre.

On peut choisir par exemple : 74% SiO₂, 15% Na₂O, 11% CaO. La viscosité de cette composition est suffisamment basse pour permettre son élaboration à l'aide d'un feu de bois (1400 °C) et d'autre part elle est suffisamment élevée à 1100 °C (soit 100 °C au-dessus du liquidus) pour commencer les opérations de formage. Enfin la résistance à l'eau de ce verre est suffisante pour la gobeletterie, les bouteilles et le vitrage [11].

Les verres sodo-calciques modernes contiennent d'autres oxydes en petites quantités notamment Al₂O₃ qui, à partir de quelques dixièmes de %, améliore sensiblement la résistance à l'eau. Un autre oxyde qu'on trouve toujours dans le verre plat est MgO qui, lorsqu'il remplace partiellement CaO, réduit notablement la température de liquidus. Cela permet de disposer d'un liquide très visqueux dès le début du formage [10].

I.10.2.2. Les verres de borosilicates :

Le verre borosilicate est un verre contenant entre 7 et 15 % d'oxyde de bore. Il présente une dilatation équivalant à un tiers à deux tiers de celle du verre silico-sodo-calcique. Il possède également une excellente résistance aux acides. Ce type de verre est notamment utilisé pour les protections de feu ouvert.

Vers 1880, Otto Schott à la faveur des nombreux essais qu'il effectuait sur les borosilicates pour élargir la gamme des verres d'optique, se rendit compte que l'introduction de B₂O₃ dans la composition améliorerait sensiblement la résistance du verre au choc thermique et aux attaques chimiques.

Par suite de leur excellente résistance à la corrosion, un autre grand domaine d'application des verres de borosilicate concerne la chimie et la pharmacie. Les flacons en verre ne doivent pas relâcher d'ions alcalins dans le liquide qu'ils contiennent, même en autoclave.

Le « verre neutre », souvent utilisé en pharmacie, a pour composition pondérale : 62% SiO₂, 12 % B₂O₃, 6% Al₂O₃, 2% BaO, 1% ZnO et 10% (Na₂O + K₂O) [10].

I.10.2.3. Les verres d'aluminosilicates :

A la base, on a développé ce verre dans le but de réaliser un tissu isolant, à faible perte diélectrique et résistant à la chaleur et aux attaques hydrolytiques pour des appareillages électriques de puissance (générateurs, moteurs, transformateurs). On peut retrouver une composition voisine de l'eutectique 22% SiO₂, 3% Al₂O₃, 9% CaO chez la firme américaine Owens-Corning Fibre Glass dont le liquidus est à 1170°C. Cependant, environ 7% de B₂O₃ furent ajoutés pour pouvoir l'élaborer sous forme de fibres vers 1150 °C [11].

Les fibres de verre d'alumino-silicates peuvent être mélangées à une résine de synthèse (thermodurcissable ou thermoplastique) pour en renforcer les propriétés mécaniques. D'ailleurs ces fibres de verre-résine sont largement imputrescibles et incombustibles. Ils connaissent de ce fait de multiples applications dans les transports, le bâtiment et la marine de plaisance.

Des performances mécaniques encore plus élevées sont obtenues avec des verres du système SiO₂, MgO, Al₂O₃. Leurs compositions industrielles sont voisines de l'eutectique 65% SiO₂, 25% Al₂O₃, 10%MgO dont le liquidus est à 1475°C. Le remplacement de CaO par MgO augmente considérablement la résistance à la traction. En outre la résistance à la corrosion est remarquable. Mais leurs applications sont limitées du fait de la température nécessaire à leur élaboration atteint les 1700°C [10].

I.10.2.4. Verre au plomb :

Il s'agit de vitrages ayant une teneur en plomb de l'ordre de 70%, ce qui permet une forte atténuation des rayons X et γ . Ils sont sensibles à l'oxydation et il faut donc éviter leur contact avec l'eau et les détergents. Leur masse volumique équivaut environ au double de celle du verre classique. Ils sont utilisés pour les parois vitrées de salles de radiologie médicale ou industrielle.

L'introduction d'oxyde de plomb dans la composition des verres remonte au XVII^{ème} siècle. Le chimiste Thomas Percival conçut un four qui utilisait le charbon, qui, lui, était abondant. Il était nécessaire, pour éviter que les fumées réductrices ne provoquent la coloration du verre, d'utiliser des creusets fermés. Muni de cet outil, un verrier, George Ravenscroft, s'efforça de mettre au point un verre transparent pouvant rivaliser avec le cristal de Bohême, et moins tributaire des matières premières importées, notamment les cendres de plantes marines [11].

I.10.2.5. Verre de borates :

Les verres de borate sont constitués de l'anhydride borique B_2O_3 qu'il est passant systématiquement à l'état vitreux au refroidissement. A cause de son hygroscopicité (le verre de B_2O_3 est très soluble dans l'eau), le verre de borate n'est jamais utilisé seul dans la pratique mais entre la composition de nombreuse verre industriels. Les verres de borates ont fait l'objet de nombreux travaux à cause de leur température d'élaboration moins élevée que celle des silicates.

Les bora-aluminates du système $CaO-B_2O_3-Al_2O_3$ possèdent une isolation électrique élevée qu'ils trouvent lieu dans les applications électrotechnique.

La famille de borosilicate du système $80SiO_2-15B_2O_3-5Na_2O$ est la plus adoptée dans les verres de Pyrex, Simax ou Vycor. Ces verres sont utilisés essentiellement en chimie pour la verrerie de laboratoires à cause de leur faible coefficient de dilatation thermique (voisin de $3.10^{-6} K^{-1}$) et leur bonne résistance chimique [14].

I.10.2.6. Verre de phosphate :

Les verres phosphatés se singularisent des silicates par leur faible température de fusion, leur grande transparence dans l'UV et leur faible transparence dans l'IR. Les verres phosphates sont très performants surtout lorsqu'ils sont dopés aux ions de terres rares tels que l' Er^{3+} .

Ils s'avèrent être d'excellents candidats pour les applications à gain élevé (amplificateurs optiques compacts) [15].

Cependant, les verres phosphates s'accompagnent d'une faible durabilité chimique. Pour pallier cet inconvénient, il est possible de stabiliser la matrice phosphatée en modifiant sa composition.

De séries de verre phosphaté ont été développé tel que le verre bora-phosphaté qui se trouve dans des applications majeures (scellement, revêtement) ainsi que le verre silico-phosphaté qui a été développé pour la technologie de conducteurs optiques (photonique) [14].

I.10.2.7. Verres de Germinâtes :

L'oxyde de germanium GeO_2 forme un verre iso-structural de la silice à base de tétraèdres GeO_4 . Du fait de son prix qui est très élevé, sa faible réfractivité et sa moindre résistance aux agents corrosifs, il est rarement utilisé dans les compositions verrières.

Cependant son importance est surtout d'ordre fondamental lorsqu'on l'ajoute comme dopant dans le verre de silice pour augmenter l'indice de réfraction, ce qui en fait un élément de choix pour la réalisation du cœur des fibres optiques pour la télécommunication à longue distance [14].

I.10.2.8. Verre de Chalcogénures :

On appelle un chalcogène les éléments S, Se, Te. Il peut former de verre eux-mêmes à eux tout seul ou avec l'association d'autres éléments du groupe IV (Ge, Si, Sn) et le groupe V (Sb, As) [8]. Ils forment des verres binaires tel que As_2S_3 , As_2Se_3 , GeS_2 ou ternaires tel que $As_2S_3-Ag_2S$, $Sb_2S_3-Ag_2S$, $B_2S_3-Li_2S$ [2]. Dans un domaine de vitrification plus étendu. La plupart des verres chalcogénures sont opaques dans le domaine de visible et transparents dans l'infrarouge (jusqu'à $30\mu m$). Ils possèdent également une température de ramollissement entre $100-300C^\circ$ et une faible résistance chimique. De ce fait ils sont utilisés principalement au domaine d'optique infrarouge (lentilles, capteurs infrarouge, xérographie...) [13].

I.10.2.9. Verre d'Halogénures :

C'est une grande famille de verres composée essentiellement des éléments halogènes tels que le chlore, le bromure, l'iode ou le fluor. On connaît les verres chlorés comme : $ZnCl_2$, $BiCl_3$, $CdCl_2$, ou d'autres verres halogénés comme : $ZnBr_2$, PbI_2 . Tous ces verres sont transparents dans l'infrarouge alors que leur application reste hypothétique [13].

I.10.2.10. Verres de Fluorures :

Les fluorures comme les oxydes peuvent former des verres en raison de leur rayon ionique de l'ion F^- très voisin de l'ion O^{2-} ($R_{F^-} = 1,285$; $R_{O^{2-}}=1,35$). Les verres de BeF_2 et les fluorures beurlâtes forment des verres iso structuraux de silicates. Par la suite les verres dits ABF (Aluminium Béryllium Fluor) issu du système $BaF_2-CaF_2-AlF_3-BeF_2$ ont été proposés [13].

Chapitre II

Le Verre Recyclé En Algérie Et
Proposition De Nouvelle Idée Pour
L'exploitation Du Verre Recyclé.

Chapitre II.

II.1. Introduction

La gestion des déchets en Algérie constitue un défi majeur pour l'environnement et la santé publique.

Parmi les déchets recyclables, le verre représente une part non négligeable. Le recyclage du verre présente des avantages considérables : réduction de la pollution, préservation des ressources naturelles, création d'emplois, etc.

Ce chapitre se concentre sur l'exploitation du verre recyclé en Algérie, en analysant les domaines d'application existants et en proposant une nouvelle idée pour valoriser ce matériau.

II.2. Définition du recyclage :

Le recyclage correspond à la réutilisation des déchets par le producteur. Il peut être court, lorsque ces derniers sont recyclés directement par l'agent ou cédé à un autre producteur de la même branche d'activité. Il s'agit alors de chute de production, que l'on observe dans les aciéries ou papeteries, par exemple. Il peut être long, lorsqu'ils empruntent des filières de collecte et de prétraitement assurées par des professionnels de la récupération. C'est le cas des déchets industriels et commerciaux banals ou de ceux qui sont issus de la consommation des ménages. Rappelent que des millions de tonnes de matériaux résiduaux produits par les sociétés modernes peuvent être récupérés et recyclés. Leur valorisation peut emprunter plusieurs voies [16] :

- La réutilisation des produits usagés sous la même forme, telle que la consignation de bouteilles ; La réintégration de matériaux dans le cycle productif dont ils sont issus (closed loop recycling), comme c'est le cas des fibres cellulosiques de récupération dans la fabrication de papiers et cartons ou du calcin dans celle des bouteilles ;
- L'intégration de matériaux dans d'autres formes de production que celles dont ils sont issus (open-loop recycling), tels les exemples du verre dans les travaux routiers, de la partie fermentescible des résidus dans l'élaboration de compost ou bien des déchets d'emballage en plastique utilisés dans la fabrication de mobilier ou de piquets de vigne ;
- Enfin, la valorisation énergétique des résidus via leur incinération avec récupération de la vapeur dégagée et/ou la production d'électricité [16].

II.3. Le verre récupéré : le calcin

Le calcin est du verre récupéré à partir de déchets (ménagers et assimilés, etc.) ou directement à partir de chutes de fabrication. Il est d'abord trié et nettoyé pour éliminer toutes les impuretés. Ensuite, avant d'être introduit avec les matières premières afin de former le lit de fusion, il est broyé très finement [4].



Figure II.1 : Calcin.

L'utilisation du calcin présente de nombreux avantages pour l'environnement, ainsi que pour le verrier. En effet :

- Elle ne nécessite pas l'extraction de matières premières naturelles et évite la consommation de 60 Kg de fuel par tonne de calcin utilisé pour l'extraction des matières premières naturelles ;
- Elle évite le transport de matières premières naturelles sur de longues distances pour transporter le calcin sur de plus courtes distances. Elle limite donc la pollution atmosphérique due au déplacement ;
- Elle diminue la température de fusion (le calcin doit être chauffé à une température plus basse que les matières premières naturelles pour être fondu). Elle permet donc l'économie de 40 kg de fuel par tonne de calcin utilisé [4].

Cependant, l'industrie ne peut pas fabriquer de verre uniquement à partir de calcin. Il est nécessaire d'introduire des matières premières naturelles afin de corriger les propriétés du lit de fusion

(couleur, propriétés optiques, mécaniques, etc.) et ainsi obtenir une homogénéité dans la qualité du produit fabriqué.

De plus, la nature du calcin est très importante car elle détermine son intégration dans la composition de certains verres :

- Le verre d'emballage coloré contient du calcin issu de verre d'emballages coloré, incolore ou mixte ;
- Le verre d'emballage incolore ne peut contenir que du calcin incolore ayant pour origine les emballages ;
- Le verre à vitres ne peut contenir que du calcin incolore essentiellement composé de chutes de découpe de verre à vitres ;
- Le verre pour ampoules électriques et tubes fluorescents, ainsi que celui pour les écrans, ne pourront contenir que du calcin de même nature [17].

II.4. Exploitation des domaines liés au verre recyclé en Algérie :

II.4.1. Le Context Algérien:

L'Algérie produit chaque année des millions de tonnes de déchets solides urbains. La composition de ces déchets varie d'une région à l'autre, mais le verre y occupe une place significative.

Malgré les efforts pour développer la gestion des déchets, les décharges à ciel ouvert restent la méthode d'élimination dominante en Algérie. Cela engendre de graves conséquences environnementales et sanitaires.

II.4.2. Domaines d'application du verre recyclé :

Le verre recyclé, souvent appelé "calcin", peut être utilisé dans plusieurs domaines :

- **L'industrie verrière** : Le calcin est un ingrédient essentiel dans la fabrication de nouveaux produits en verre. Il permet de réduire la consommation d'énergie et de matières premières vierges.
- **La construction** : Le verre recyclé est utilisé comme agrégat dans la fabrication de parpaings, de bétons légers, de pavés, etc. Il peut également servir comme isolant thermique et acoustique.

- **L'abrasion** : Les microbilles de verre recyclé sont utilisées dans des applications de sablage et de polissage.
- **La décoration** : Le verre recyclé est utilisé pour créer des mosaïques, des sculptures, des objets décoratifs, etc. [17].

II.4.3. Les défis du recyclage du verre en Algérie :

Le recyclage du verre en Algérie fait face à plusieurs défis :

- **Manque d'infrastructures** : La plupart des centres de tri et de recyclage du verre sont insuffisants en nombre et en équipements.
- **Manque de sensibilisation** : La population n'est pas suffisamment sensibilisée au recyclage et au tri sélectif.
- **Manque de législation** : La législation concernant la gestion des déchets et le recyclage est encore en développement.
- **Coûts de transport** : Le transport du verre recyclé vers les centres de recyclage est coûteux, ce qui rend le processus moins rentable.

II.5. Proposition d'une nouvelle idée pour l'exploitation du verre recyclé

II.5.1. La Valorisation du verre recyclé dans les travaux publics

L'utilisation du verre recyclé dans les travaux publics offre un potentiel de développement important en Algérie.

Proposition :

Développer des solutions pour incorporer le verre recyclé dans les remblais routiers et les structures en béton.

Avantages :

- **Réduction de la quantité de déchets** : Valoriser les déchets de verre en leur donnant une nouvelle vie dans les travaux publics.
- **Amélioration des propriétés des remblais** : Le verre recyclé peut améliorer la drainabilité et la résistance des remblais.
- **Réduction de la consommation de ressources** : Diminuer la nécessité d'extraire des matériaux vierges pour les travaux publics.

- **Création d'emplois** : Développer des filières locales pour la production et la commercialisation de matériaux à base de verre recyclé.

Défis à relever :

- **Développement de normes et de techniques d'incorporation** : Adapter les techniques de construction pour intégrer le verre recyclé dans les remblais et le béton.
- **Optimisation du processus de broyage** : Déterminer la taille optimale des particules de verre pour maximiser son efficacité.
- **Sensibilisation des acteurs du secteur** : Promouvoir l'utilisation du verre recyclé dans les travaux publics.

II.5.2. Les déchets de verre dans la production du ciment et béton :

Différents déchets ont été utilisés dans la production du ciment et du béton comme le laitier des hauts fourneaux, la fumée la silice, l'argile et les déchets de verre.

La composition chimique des différents déchets de verre de couleurs différentes montre que le verre a une large quantité de silicate et une bonne quantité de calcium comme montré dans le tableau (II.1). Avec sa structure amorphe, le verre a la capacité d'être une pouzzolane ou même un matériau cimentaire [19].

Tableau II.1 : La composition chimique du ciment et des différents verres colorés.

Composition chimique	Ciment (%)	Verre transparent (%)	Verre ambré (%)	Verre vert (%)	Verre concassé (%)	Poudre de Verre (%)	Sable (%)
SiO_2	20.2	72.42	72.21	72.38	72.61	72.20	78.6
Al_2O_3	4.7	1.44	1.37	1.49	1.38	1.54	2.55
CaO	61.9	11.50	11.57	11.26	11.70	11.42	7.11
Fe_2O_3	3.0	0.07	0.26	0.29	0.48	0.48	2.47
MgO	2.6	0.32	0.46	0.54	0.56	0.79	0.46
Na_2O	0.19	13.64	13.75	13.52	13.12	12.85	0.42
K_2O	0.82	0.35	0.20	0.27	0.38	0.43	0.64
SO_3	3.9	0.21	0.10	0.07	0.09	0.09	-
TiO_2	-	0.035	0.041	0.04	-	-	0.15
Perte Au Feu (PAF)	1.9	-	-	-	0.22	0.36	7.6

La structure non biodégradable gêne étroitement la mise des déchets de verre en décharges ; aussi l'industrie du ciment et du béton peuvent fournir une solution adéquate pour une gestion environnemental de ces déchets.

De nombreuses études ont été faites à propos de l'utilisation des déchets de verre dans l'industrie du ciment et du béton. Dans certains travaux ils ont été utilisés comme agrégats, dans d'autres comme ajouts cimentaires. Certaines études ont même essayé de combiné les deux c.à.d. comme agrégats et ajout cimentaire dans le même mélange [19].



Figure II.2 : L'application actuelle et potentielle de produits en béton avec le verre dans la construction.

II.5.3. L'utilisation des déchets de verre comme remplacement de ciment :

L'utilisation des déchets de verre comme agrégats dans la production des bétons est très limitée et n'a pas produit de résultats satisfaisants à cause des réactions Alkali-Silica (RAS) entre le ciment et les agrégats en verre mais aussi à cause des performances produites. Les propriétés pouzzolaniques du verre à suscité la curiosité d'utiliser le verre comme ajout cimentaire ou matériau cimentaire dans la production du béton. Il faut noter aussi que les propriétés pouzzolaniques sont étroitement liées aux tailles des particules du verre [19].

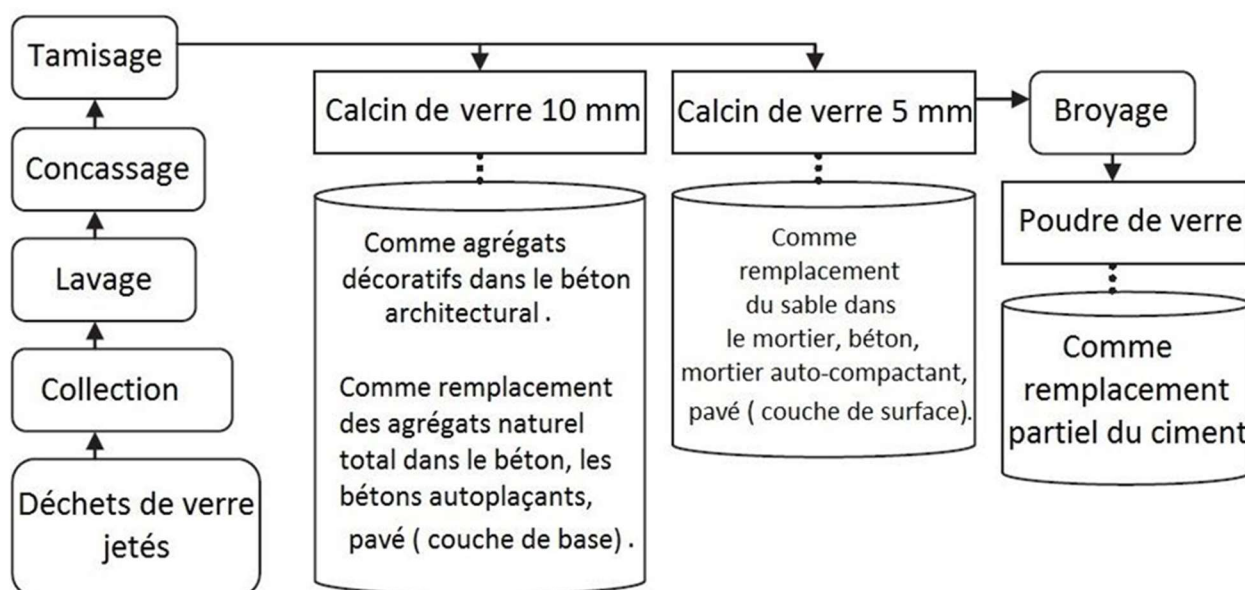


Figure II.3 : Les étapes de recyclage des déchets de verre en des matériaux cimentaires et granulaires.

II.6. Conclusion:

Le recyclage du verre en Algérie est un enjeu important pour l'environnement et l'économie du pays. La valorisation du verre recyclé dans les travaux publics offre une solution innovante et durable pour gérer ce type de déchets.

L'intégration de l'innovation technologique, la sensibilisation des acteurs et le développement de politiques publiques adéquates sont essentiels pour réussir la transition vers une gestion durable des déchets en Algérie.

Chapitre III

Proposition d'un processus de
recyclage du verre.

Chapitre III.

III.1. Introduction:

La première étape du recyclage du verre est la collecte sélective, qui permet de séparer le verre des autres déchets. Ensuite, le verre est transporté vers un centre de traitement pour être trié, nettoyé et broyé. Enfin, le verre broyé est utilisé pour fabriquer de nouveaux produits en verre ou pour d'autres applications.

Ce chapitre se concentre sur la proposition d'un processus de recyclage du verre en Algérie, en présentant les différentes étapes du processus et les installations nécessaires.

III.2. Proposition d'un processus de recyclage du verre :

Le verre d'emballage ménager doit subir plusieurs étapes de traitement avant de pouvoir être recyclé.

III.2.1. Pré tri :

Un premier tri est effectué par le consommateur qui dépose le verre dans des conteneurs de proximité mis à sa disposition par la municipalité, ce qui n'existe pas en Algérie [18].

III.2.2. Collecte :

Les conteneurs de proximité sont vidés dans des camions-benne pour être acheminés vers un centre de traitement. Le verre y subit un premier tri manuel qui permet d'enlever les objets de taille importante qui pourraient s'y trouver mêlés, des bouteilles ou des sacs en plastique par exemple [18].

III.2.3. Tri et conditionnement :

Au centre de traitement, le verre subit une série de tris

- Tris mécaniques pour éliminer les métaux ferreux ou non-ferreux (acier, aluminium)
- Tri optique au laser identifie et extrait les matériaux infusibles
- Soufflage permet d'extraire les éléments légers : les bouchons, le papier
- Broyage et transformation en calcin, calibré à la demande des verriers pour refaire des emballages en verre [18]

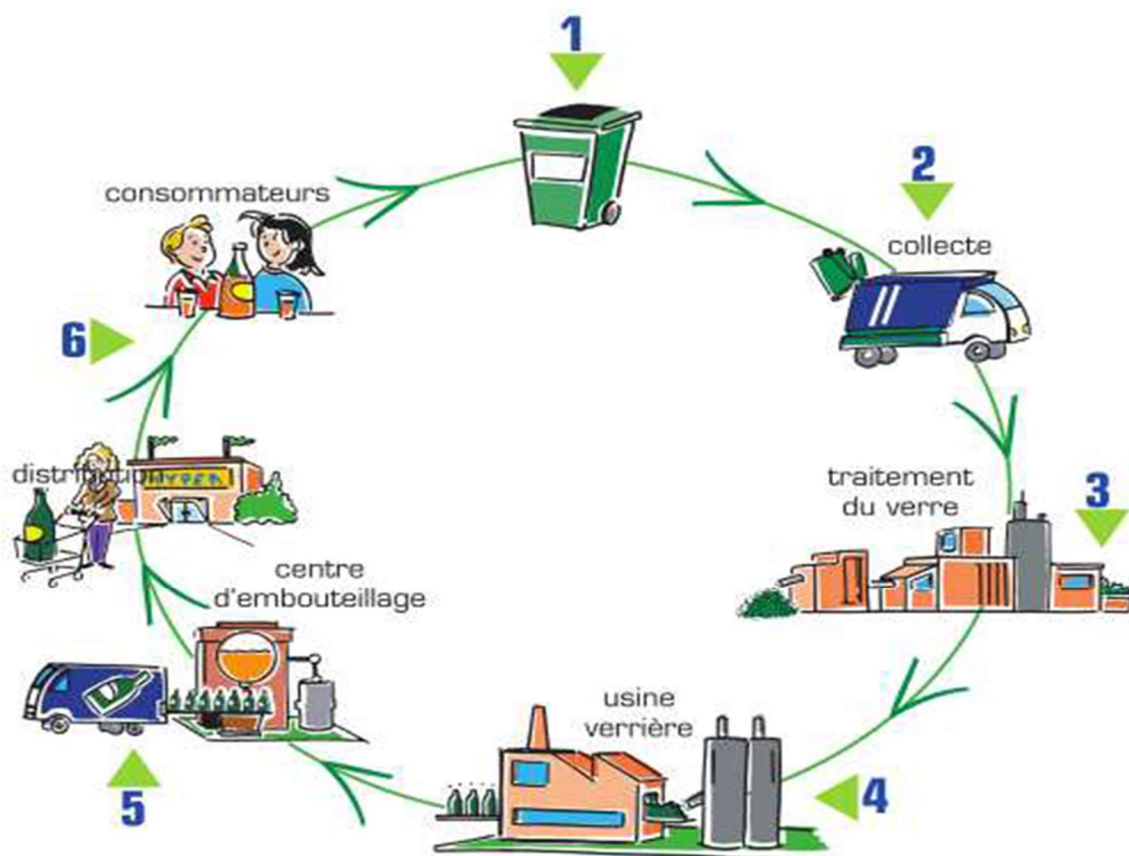


Figure III.1 : Les étapes de collecte du verre.

III.2.4. Domaines de recyclage des déchets de verre :

Le recyclage du verre d'emballage possède de nombreux avantages, et celui notamment d'être utilisé à l'infini. Le verre après broyage peut être réutilisé sous plusieurs formes dans plusieurs secteurs d'activité :

- **La construction** : il remplace les gravillons qu'on peut trouver dans les parpaings, et possède des qualités d'acoustique et de légèreté.
- **L'abrasion** : les microbilles de verre pour traiter des surfaces sans les endommager ou la poudre de verre afin de préparer des surfaces à travailler, et les billes de verre pour le broyage
- **Les pigments pour la peinture** : dans les enduits pour un effet esthétique particulier ou dans la peinture pour la signalisation routière.
- **Les matériaux de décoration** : dans les roches décoratives pour la mosaïque par exemple.
- **Le nettoyage** : par la libération de soude et de potasse, ainsi que grâce à ses microparticules, qui possèdent des qualités de détergents [4].

III.3. Installations Necessaires:

La mise en place d'un processus de recyclage du verre en Algérie nécessite des installations spécifiques :

- **Centre de Tri et de Recyclage** : Un bâtiment adapté avec des zones dédiées à la réception, au tri, au nettoyage, au broyage, au stockage et à l'expédition du verre recyclé.
- **Matériel de Collecte** : Conteneurs à verre, camions de collecte adaptés, etc.
- **Matériel de Tri** : Lignes de tri manuelles et mécaniques, tapis transporteurs, etc.
- **Matériel de Nettoyage** : Laves-verres, sécheuses, etc.
- **Matériel de Broyage** : Broyeurs à marteaux, broyeurs à meules, etc.
- **Matériel de Stockage** : Silos, conteneurs, etc.

III.4. Disponibilité et quantification des verres à recycler :

La génération des déchets solides urbains est déjà évaluée à environ 8.5 millions de tonnes par an, soit 23 288 tonnes par jour en 2005, et cette production connaît une progression sensible.

Selon le MATE (Ministère de l'aménagement du territoire et de l'Environnement), le seuil des 12 millions de tonnes de déchets solides urbains est certainement franchi en 2010.

Les déchets solides urbains sont générés par la consommation des ménages, des institutions publiques (écoles, hôpitaux, etc.), des commerces et des entreprises. Les quantités de déchets produits varient d'une ville à l'autre dans les pays en développement, en fonction de plusieurs facteurs, notamment la croissance démographique. Par exemple, en 2007, la société Net-Com a collecté 763 382 tonnes de déchets (déchets ménagers et assimilés) dans 28 municipalités de l'État d'Algérie où elle opère.

Tableau III.1 : Quantité des déchets produits par habitant (d'après rapport sur l'État de l'environnement en Algérie MATE 2005).

	Taux de génération Kg/hab/j		
	1980	2002	2005
Villes moyennes	0.5	0.6	0.8
Grandes villes	0.76	0.9	1.2

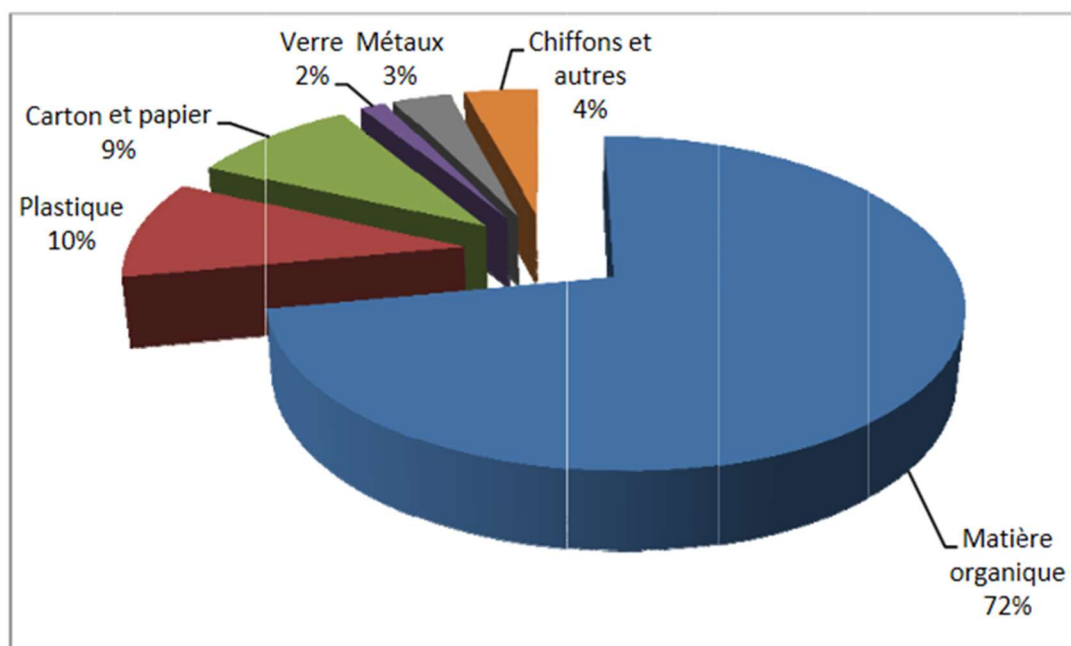


Figure III.2 : composition déchets ménagers en Algérie.

Les matières organiques représentent plus de 72 % du volume des déchets en général. Alors que l'ensemble des déchets recyclables (plastique, papier verre, métaux) ne représente que 28 % du volume des déchets.

Tableau III.2 : quantités des principaux déchets recyclables.

	Alger 2003	Oran 2001	Médéa 1998	Bechar 1999
Matières organique	75	82.4	70	56.53
Papier – carton	13	12.5	11.65	13.2
Plastiques	10	8.30	13.5	12.8
Métaux	1.3	2.6	1.35	4.86
Verres	0.8	1.3	0.5	2.66

En Algérie, la quantité de déchets ménagers et assimilés a connu une augmentation substantielle au cours des dernières décennies en raison d'une croissance démographique galopante conjuguée à

une urbanisation non maîtrisée. Ce phénomène est accentué en raison d'insuffisance de moyens et d'équipements appropriés.

Parallèlement, la composition de ces déchets est en phase de passer d'un profil organique (déchets alimentaires) à des matériaux complexes (emballages, plastiques, produits en fin de vie, etc.) qui présentent des risques majeurs pour l'environnement et la santé publique. La méthode pratiquée pour leur élimination demeure à ce jour la mise en décharge, du fait de son faible coût par rapport aux autres filières comme l'incinération ou le compostage [20].

III.5. Procédés d'élaboration des verres :

Le procédé de fabrication du verre est constitué des étapes suivantes :

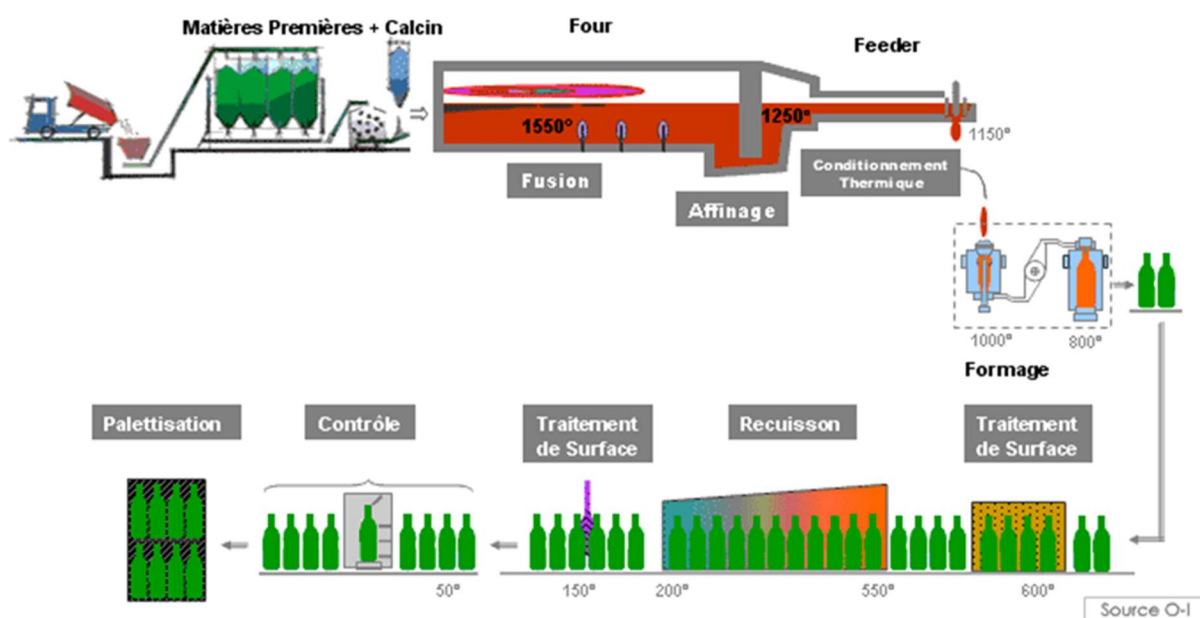


Figure III.3 : Une ligne de fabrication de verre d'emballage.

III.5.1. Traitement du sable :

Le procédé proposé comporte sur 6 étapes :

1. Réception de sable brut :

Le sable provenant de la carrière est chargé par pelle mécanique dans la trémie de réception. Le sable est extrait de cette trémie par l'extracteur vibrant et déchargé sur le transporteur d'alimentation du crible de contrôle. Le crible de contrôle sert à éliminer les particules trop grosses (> à 2 mm) ainsi que les corps étrangers contenus dans le sable, le criblage se fait par voie humide.

Le produit à la sortie du crible de contrôle est récolté dans une bêche de pompe et dirigé vers les deux hydro-cyclones au moyen de la pompe [21].



Figure III.4 : Traitement du sable .

2. Section lavage et coupure :

La sous -verse du cyclone alimente un tamis à grille statique ou s'opère la coupure ($630\ \mu\text{m}$) qui est ensuite dirigée vers un classificateur à vis pour un épaissement et une évacuation du filler.

Ce classificateur alimente une quadruple cellule d'attrition. Les produits attrition arrivés sont récoltés dans une bêche de pompe d'où ils sont relevés vers un hydro-cyclone au moyen de la pompe [21].

3. Filtration :

A la position de l'unisizer, la pompe dirige le produit vers le filtre à dépression via un hydro-cyclone. Sous l'effet de la dépression créée sous la toile filtrante par un ventilateur, l'eau traverse cette toile et est recueillie dans l'hydro-séparateur placé sous le filtre, qui sert en même temps de joint hydraulique.

4. Séchage :

Le produit extrait du filtre à dépression a une teneur en eau de l'ordre de 6 à 7%. Il est dirigé vers le tambour de séchage au moyen d'une chute et d'un alimentateur vibrant.

Le séchage se fait au moyen d'air chauffé par un bruleur au gaz naturel. Un circuit aller-retour créé à l'intérieur du tambour de séchage permet au produit (teneur en eau inférieure ou égale à 1%) de ressortir par l'extrémité du tambour par là-même où il est entré.

Le produit sec s'écoule de façon naturelle sur un transporteur à raclettes qui le répartit uniformément dans les 6 trémies d'alimentation des séparateurs magnétiques.

5. Séparation magnétique :

Le sable sec s'écoule sous forme d'un mince rideau entre les rouleaux induits des séparateurs magnétique. Le type de séparateur choisi comporte deux rouleaux induits. Les particules magnétiques sont séparées du produit.

6. Stockage :

Ce dernier est recueilli sur un transporteur à chariot verseur qui assure la mise en tas du produit, tandis que les magnétiques sont eux recueillis sur le transporteur qui les dirige vers une cellule de stockage en béton armé.

Le sable est utilisé dans l'industrie du verre pour sa teneur élevée en Silice, l'introduction du sable dans la Composition doit avoir une granulométrie comprise entre 0.2 et 0.4mm [21].

III.5.2. L'atelier de composition (enfournement) :

Dans cette étape les matières premières sont mélangées, selon des proportions soigneusement définies.

- Stockage des matières premières dans les silos.
- Pesage.
- Malaxage dans des mélangeurs.
- Transfert vers le four [14].

III.5.2.1. Préparation du Mélange vitrifiable :

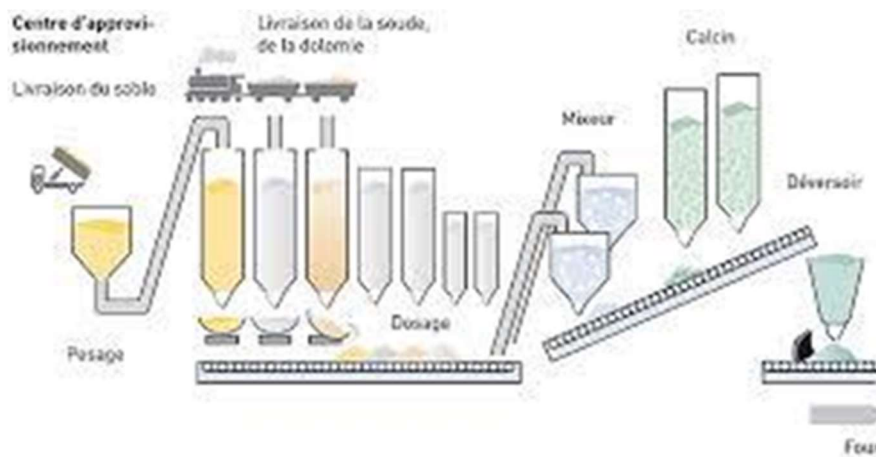
- **Elément fondamentaux :**
 - Le Sable est un élément formateur 68% à 72%.
 - La carbonate de soude : élément fondant 10% à 15%.
 - Le calcaire : élément stabilisateur 09% à 14%.
- **Elément secondaires :** Dolomie - Alumine - Sulfate... etc.
- **Colorant :** Oxyde métallique en pourcentage très faible (Fer, Sélénium, Oxyde de cobalt, Oxyde de chrome, Oxyde de cuivre noir).
- **Calcin (verre concassé) :** Le calcin permet de réaliser des économies d'énergie.

Tableau III.3 : Les matières premières et leurs intérêts à la verrerie .

Nom	Fonction	Mais encore
La silice	Vitrifier	Apporté par le sable de silice
Le carbonate de soude	Fondre	Permet d'abaisser la température de fusion de La composition
La calcite		Calcaire naturel sous forme de chaux
Le sulfate de soude		En substituant au carbonate
Le calcine	Amorcer la fusion	Verre concassé qui provient des verres ou de la récupération
La magnésie	Stabiliser	Apporté par la dolomie, qui permet au verre en cours de travail de se maintenir suffisamment plastique sur un long palier de température
L'alumine	Augmenter la résistance thermique et la viscosité	Apporté par le feldspath
Le minium	Réfranger	Réfraction à lumière

Le mélange est ensuite déversé dans le four. Cette composition est acheminée par bande transporteuse vers un silo d'enfournement situé en amont de chaque four.

Les opérations de pesage, de mélange et de transport sont entièrement automatiques [21].

**Figure III.5** : Schéma d'enfournement du verre .

III.5.3. Cuve de fusion :

Le mélange vitreux est stocké dans la cellule journalier, et fondu dans un four s'élevant jusqu'à de température proche de 1550°C. Entre l'introduction des matières premières et la sortie du verre en fusion, il fonctionne à feu contenu 24/24 heure.

Le four fonctionne jour et nuit, avec un niveau de verre en fusion constant. Des flammes alimentées par brûleurs assurent, avec le rayonnement de la voûte de briques en silice, une température de 1550°C nécessaire à la fusion du verre [16].

Par exemple la transformation du mélange vitrifiable en verre est réalisée dans un four dont les caractéristiques principales sont les suivantes :

- * Four de fusion à récupération de chaleur.
- * Surface de fusion : 55m².
- * Capacité : 80 tonne/jour sans électrode.
- * Chauffage : Gaz et/ou fuel + électricité.

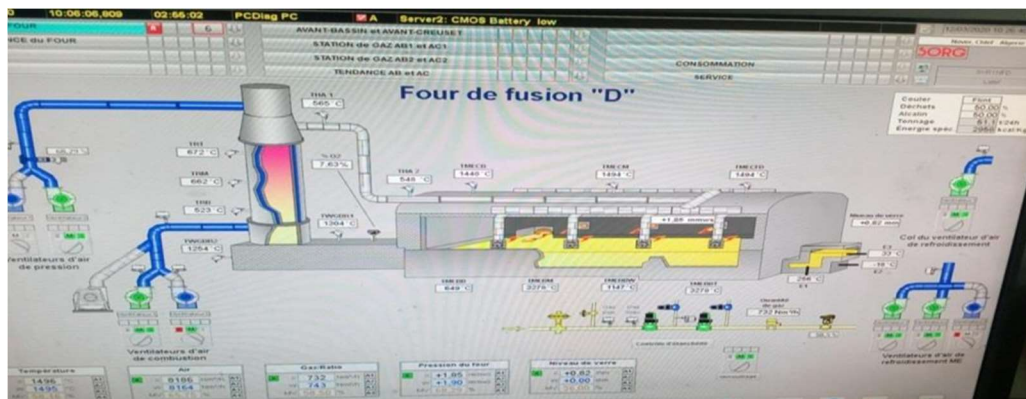


Figure III.6 : Salle de contrôle du four de fusion .

Aujourd'hui, les verres fabriqués dans les industries sont [21] :

III.5.3.1.1 Verre plat:

Les verres plats font partie de l'ensemble des verres fabriqués sous forme de feuilles. Produits principalement par l'industrie du vitrage mais aussi pour la fabrication des miroirs, leur sens fait opposition à la famille des verres creux (gobeletterie, produits de laboratoire, récipients, etc...) [21].



Figure III.7 : Exemple du verre plat.

III.5.3.1.2 Verre creux:

Les verres creux définissent tous les produits ayant une forme non plane (gobeletterie, bouteillerie, tubes de laboratoire, récipients, etc...). Ils peuvent néanmoins être produits à partir d'un verre plat (verre bombé). Il peut être principalement façonné par soufflage, pressage et centrifugation. Cependant dans l'industrie le façonnage du verre creux est souvent la combinaison de plusieurs méthodes et même le collage chaud et froid, bombage et usinage [14].



Figure III.8 : Exemple du verre creux.

Pour le four de verre creux, comprend deux parties :

- **Zone de fusion :** Le verre n'a pas de point de fusion déterminé, il passe progressivement de l'état solide à l'état pâteux, puis à l'état liquide. La température de cette zone est de 1500 °C.
- **Zone d'affinage :** Afin d'avoir un verre homogène et de bonne qualité, le verre en fusion passe dans la zone d'affinage où la température est portée à 1580 °C, pour but d'éliminer les petites bulles de gaz carboniques inclus dans le verre.

Après la zone d'affinage, le four se sépare en deux parties appelées bassin de travail.

Le verre est alors légèrement refroidi avant de passer dans canal réfractaire appelée Feeder, son rôle est d'acheminer le verre à la machine et de le conditionner en vue de son élaboration.

La température est alors de l'ordre de 1150 °C, le verre est à l'état pâteux [21].

III.5.4. Fabrication (Formage):

L'opération de façonnage s'effectue au niveau des machines IS et presse à une température de 950°C. Après son passage par un mécanisme dit Spoot, ce dernier a pour rôle l'homogénéisation du verre grâce au tube TOURNANT jouant un rôle d'un malaxeur.

Le formage de la bouteille comprend différentes phases :

III.5.4.1. Formage de la paraison :

La paraison est la goutte de verre nécessaire à la fabrication d'une bouteille. Son poids sera exactement celui de la bouteille, il est très précis (ou moins +2g pour certaines fabrication). La paraison doit avoir une forme précise et un diamètre précis afin de pénétrer correctement dans le moule à faire l'ébauche.

La température de la paraison importe beaucoup sur la fabrication de la bouteille. Elle est en environ 950°C et varie avec le format de la bouteille. L'ensemble du mécanisme qui fabrique la paraison s'appelle le mécanisme Feeder. La paraison a une forme définie, un longueur et diamètre précis [21].

III.5.4.2. Ebauche de la bouteille :

L'ébauche de la bouteille est l'état intermédiaire entre la paraison et la bouteille fini, la paraison tombe dans un moule appelé ébaucheur, un poinçon monte et presse, le verre entre les parois de moule, celui -ci remplit le volume disponible formant ainsi l'ébauche et la bague de la bouteille.

III.5.4.3. Finition de la bouteille :

L'ébauche de la bouteille est transférée dans un moule finisseur, elle est gonflée par l'air comprimé qui souffle dans l'ébauche, le verre se plaque entre les parois internes du moule et de son fond, la forme définitive de la bouteille est acquise.

Le formage de la bouteille (ébauche-finition) se fait automatiquement par une machine modulaire dite IS.

Les performances de la fabrication du verre creux dépendent fortement des matériaux utilisés pour les moules (ébaucheurs et finisseurs) et pour les accessoires (poinçons, moule de bague). Ces matériaux doivent posséder des caractéristiques bien particulières au niveau de :

- La résistance à l'usure à haute température ;
- La conductibilité de la chaleur (évaluée par la conductibilité thermique) ;
- L'usinabilité ;
- L'aptitude au démoulage (mesurée par la résistance à l'oxydation).

Les matériaux les plus utilisés à ce jour sont les fontes, les aciers, les alliages de cuivre et les alliages de nickel et cobalt [21].

III.5.4.4. Evacuation de la bouteille :

La bouteille terminée est extraite par un mécanisme appelé Take-Out puis évacuée sur un tapis convoyeur [21].



Figure III.9 : Formage du verre dans une machine IS.

III.5.4.5. Les recuisons:

Au cours de son élaboration, la bouteille a subi de nombreux chocs thermiques et mécaniques, ce qui crée des tensions dans la matière. Le but du recuit est d'éliminer ces tensions pour augmenter la solidité de la bouteille.

Une fois sortie de la machine les bouteilles sont acheminées vers un tunnel appelé Arche à recuire, dans lequel les bouteilles circulent à l'aide d'un tapis en inox et sont portées à une température voisine du point de relaxation des tensions (environ 600°C) puis refroidies très lentement (pendant une heure environ). Au bout d'arche, la bouteille arrive pratiquement à température (environ 50°C) [21].



Figure III.10 : Recuison des produits en verre .

Sur les convoyeurs qui véhiculent les bouteilles jusqu'aux palettiseurs, différents contrôles sont effectués. Tous les emballages sont contrôlés par des machines électroniques qui vérifient principalement leur dimension, leur résistance et leur aspect. Des mesures sont également effectuées sur des prélèvements statistiques.

III.5.4.6. Emballage:

Les récipients en verre ayant subi les contrôles avec succès sont placés automatiquement sur des palettes, qui sont acheminées ensuite vers l'installation de housage [21].

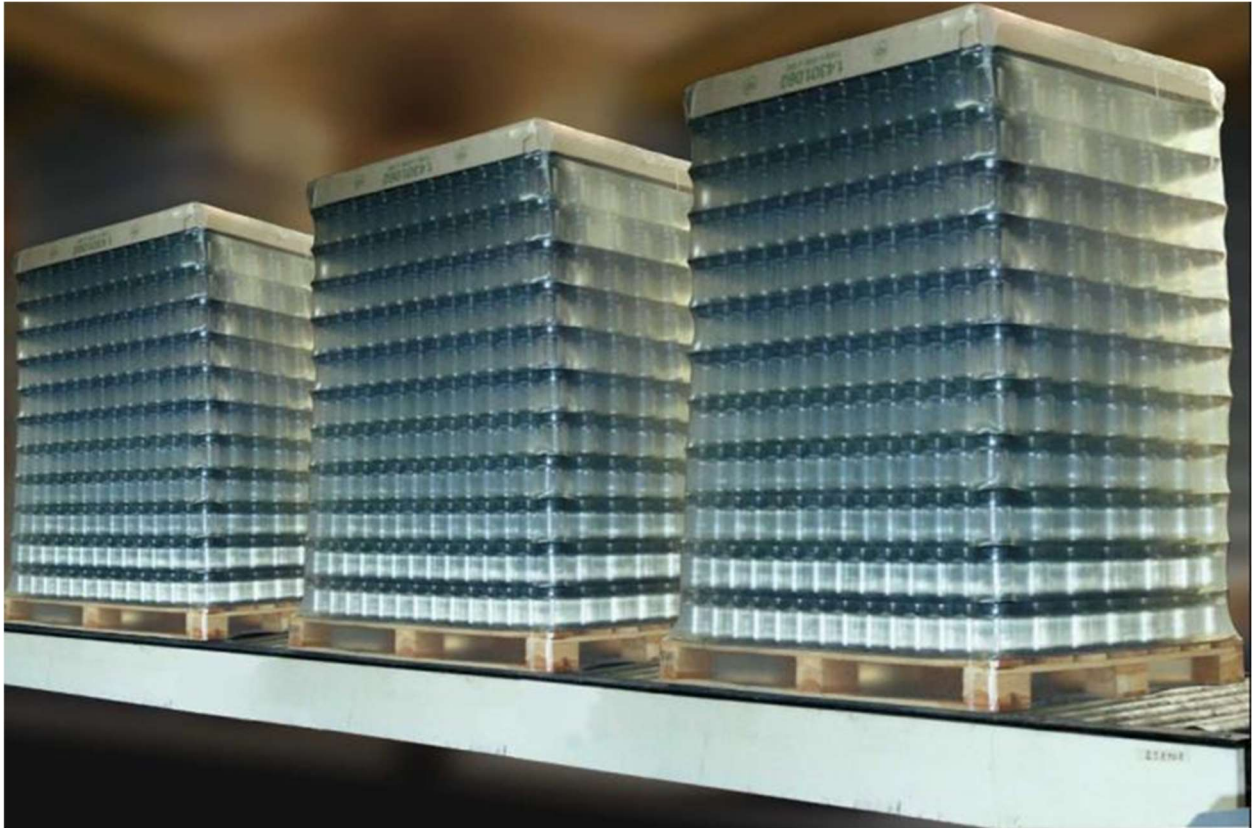


Figure III.11 : L’emballage de produit fini.

III.6. Conclusion :

La mise en place d'un processus de recyclage de verre en Algérie est un projet ambitieux, mais essentiel pour gérer les déchets de verre de manière durable. L'implantation de centres de tri et de recyclage, la sensibilisation des citoyens au tri sélectif, et l'intégration du verre recyclé dans les processus de fabrication et de construction sont des éléments clés pour réussir cette transition.

Chapitre IV

Etude du marché pour commercialiser le
verre recyclé

Chapitre IV.

IV.1. Effectuer l'étude de marché d'une entreprise de recyclage du verre :

Avant de créer une entreprise de recyclage du verre, il est primordial de réaliser une étude de marché pour votre projet.

L'étude de marché est la première étape avant de créer une entreprise. Celle-ci nous permettra de définir une offre de produits et des services en adéquation avec la demande existante.

Pour cela, nous devons récolter le plus de données possibles sur les grandes tendances du secteur du recyclage du verre et sur ses acteurs, mais aussi sur la réglementation en vigueur, sa possible évolution, etc.

Cette étude de marché va nous permettre de voir si notre projet de création d'entreprise est viable, de comprendre les besoins de nos futurs clients, et de réfléchir à la meilleure stratégie marketing pour communiquer auprès de notre cible.

Une étude de marché contient un lot significatif d'éléments, de chiffres et d'études qu'il faut bien les regrouper afin d'avoir une étude de marché propre et bien présentée.

Voici la structure de notre étude de marché pour une entreprise de recyclage du verre.

La première partie aidera à présenter le marché du recyclage du verre d'un point de vue général. On y liste des chiffres importants sur le marché mais également les tendances actuelles.

La partie qui suit donne l'occasion de bien se familiariser avec la nature de la demande : quel est le profil des potentiels clients de notre entreprise de recyclage ? quelles sont leurs habitudes de consommation ? quel est leur budget ? etc.

La troisième partie traite la compréhension de l'offre, c'est-à-dire l'étude des entreprises de recyclage du verre concurrentes. Une telle démarche nous est utile pour comprendre les facteurs (ou variables) de succès, mais également les avantages concurrentiels à construire pour une entreprise de recyclage du verre.

La partie suivante traite l'étude des éventuels fournisseurs et partenaires pour l'entreprise de recyclage du verre.

Enfin, la dernière partie de l'étude de marché va dévoiler le "Mix Marketing" pour une entreprise de recyclage du verre (ce terme fait référence à un concept qui rassemble la politique de commercialisation, de produit, de prix et de distribution), une analyse rédigée pour cette activité et, enfin, des hypothèses concernant l'estimation du revenu généré lors de la première année d'activité de l'entreprise de recyclage du verre. [22]

IV.2. Comment analyser le marché du recyclage du verre ?

Pour réussir cette démarche, il conviendra de présenter les chiffres et les données récents sur le marché du recyclage du verre. Cette initiative nous permet d'avoir une analyse détaillée sur le secteur à l'échelle nationale. Il faut donc privilégier les chiffres des dernières années et les analyses actualisées, qui révèlent des informations pertinentes sur le marché du recyclage du verre.

Synthétisez les tendances remarquables, les choses nouvelles, les dernières innovations et les changements dans les habitudes sur le marché.

Ces éléments représentent des exemples de tendances qu'on pourra retrouver dans l'étude de marché. [22]

IV.3. Comment analyser la demande pour une entreprise de recyclage du verre?

IV.3.1. Un échantillon représentatif pour l'entreprise de recyclage du verre :

Au cours de l'étude de marché pour l'entreprise de recyclage du verre, nous devons questionner ceux qui peuvent, potentiellement, faire appel à prestations de recyclage du verre.

Cependant, nous ne pouvons pas soumettre des questionnaires à l'intégralité des individus de notre marché. Il faut alors constituer ou créer ce qu'on appelle un "échantillon représentatif".

Ce terme fait référence à un groupe homogène de profils, représentant tous ceux qui sont susceptibles d'être des clients pour l'entreprise de recyclage du verre.

L'étude de marché pour une entreprise de recyclage du verre nous donnera la méthode afin de créer des échantillons pertinents, adaptés à ce type de projet [22].

IV.3.2. Le questionnaire qualitatif et le questionnaire quantitatif pour l'étude de marché d'une entreprise de recyclage du verre :

Une étude de marché complète présentera un questionnaire quantitatif et un questionnaire qualitatif.

Le questionnaire quantitatif de l'entreprise de recyclage du verre est conçu pour appréhender les habitudes, les comportements ainsi que les opinions de l'audience. Il permet, à titre d'exemple, de savoir ce que ces personnes n'aiment pas chez les entreprises de recyclage du verre concurrentes.

Le questionnaire qualitatif, lui, est utile pour collecter des informations pertinentes sur les réponses données au questionnaire quantitatif.

Dans l'étude de marché de l'entreprise de recyclage du verre, nous devons, par la suite, rédiger un rapport sur les données collectées.

Bien évidemment, l'étude de marché construite pour une entreprise de recyclage du verre contient ces deux questionnaires, sans oublier la méthodologie pour rédiger un rapport sur les données [22].

IV.3.3. Les segments de marché et les profils des clients pour l'entreprise de recyclage.

Les segments de marché de l'entreprise de recyclage du verre sont des catégories homogènes d'individus (ou d'entreprises) partageant des points communs. Cela peut être, par exemple, les mêmes aspirations, le même lieu d'habitation, ou encore le même budget mensuel.

D'éventuels segments de marché auxquels peut s'adresser une entreprise de recyclage du verre sont les entreprises de construction, les différents artisans ou bien les particuliers soucieux de l'environnement. Il y en a plein d'autres possibles.

En ce qui concerne les personnages d'achat, ils sont des représentations d'un client idéal qui pourrait potentiellement solliciter vos services de recyclage du verre.

Une persona est, pour l'expliquer simplement, une "personne imaginée" à qui on confère des critères démographiques, une mentalité, des dépenses, des habitudes et qui est le représentant d'un "segment" de marché.

Faire une persona pour l'entreprise de recyclage permet de mieux cerner les besoins de sa clientèle cible ... et donc construire une offre pertinente.

IV.3.4. La taille et la valeur du marché de l'entreprise de recyclage :

Pourquoi doit-on estimer taille et valeur du marché de l'entreprise de recyclage du verre ? Car ces chiffres et études indiquent, en réalité, le potentiel commercial et financier de notre nouveau projet.

Anticiper taille et valeur de marché donne, en effet, la possibilité de savoir combien de clients vont potentiellement faire appel à nos prestations de recyclage du verre après notre lancement.

Cette démarche permet également de savoir quel niveau de revenu l'entreprise de recyclage du verre peut, en théorie, atteindre.

Comment analyser valeur et taille du marché de l'entreprise de recyclage du verre ? Notre étude de marché pour une entreprise de recyclage du verre vous montre la méthodologie, ainsi qu'un exemple entièrement rédigé pour une entreprise de recyclage du verre.

Pour obtenir une vue d'ensemble sur les futurs revenus de l'entreprise, modifiez les hypothèses de notre prévisionnel financier pour une entreprise de recyclage du verre.

Les deux documents citer ci dessus, ainsi que le business plan et l'exécutive summary, font, bien sûr, partie, du pack complet pour une entreprise de recyclage du verre.

IV.4. Comment analyser "l'offre" dans l'étude de marché d'une entreprise de recyclage du verre ?

IV.4.1. Comment rédiger l'étude concurrentielle d'une entreprise de recyclage du verre ?

Il y aura des concurrents sur le marché du recyclage du verre. On doit retrouver une étude détaillée des entreprises de recyclage du verre concurrentes dans l'étude de marché.

Nous devons lister les attributs remarquables, ainsi que les forces de leur activité et leurs éventuels points faibles.

Listez spécialement leurs inconvénients (par exemple : des machines peu performantes, une capacité de traitement réduite, des retards dans la collecte des déchets auprès des clients, une zone d'intervention trop restreinte pour la collecte des déchets ou encore des prix de vente de produits recyclés élevés).

IV.4.2. Les éléments de succès et les avantages concurrentiels d'une entreprise de recyclage du verre :

En étudiant les entreprises de recyclage du verre concurrentes, nous allons comprendre quels sont leurs forces et leurs points d'amélioration.

Alors, nous pourrions regrouper les critères de réussite pour une entreprise de recyclage du verre, par exemple :

- Disposé d'un dépôt d'une surface importante.
- Affiche des avis positifs sur les plateformes de référencement.
- Collaboration avec les usines (pour le traitement de leurs déchets).

- Formation du personnel de manière régulière.
- Possède une grande efficacité de recyclage des matériaux.

IV.5. Comment analyser les partenaires dans l'étude de marché d'une entreprise de recyclage du verre ?

L'analyse des partenaires de l'entreprise de recyclage du verre sert de support pour identifier ces entreprises, mais aussi lister les attributs observables : leurs années d'existence, leur audience, leur politique tarifaire, etc.

Pour les partenaires éventuels pour une entreprise de recyclage du verre, on retrouve par exemple :

- Les casses automobiles (pour la destruction de véhicules, l'établissement des cartes grises et le dépannage/remorquage),
- Les collectivités locales (elles sont souvent en charge de la gestion locale des déchets ménagers et professionnels)
- Les organismes de recyclage des piles.

IV.6. Comment bien conclure l'étude de marché d'une entreprise de recyclage du verre ?

IV.6.1. Les 4P du Marketing pour une entreprise de recyclage :

Le marketing mix, également connu sous le nom de 4P du marketing, est un concept qui regroupe un ensemble de stratégies et d'initiatives à prendre pour réussir la création d'une entreprise de recyclage du verre sur un marché spécifique.

Le Marketing Mix d'une entreprise de recyclage du verre synthétise quatre politiques :

- la politique de distribution,
- la politique de produit,
- la politique de communication
- la politique de prix.

La politique produit de votre entreprise de recyclage du verre sert de support pour synthétiser tous les attributs de votre projet (L'entreprise est-elle spécialisée dans certaines matières recyclables (bois, verre, métal, véhicules hors d'usage, plastiques, etc.) ? Quels sont les produits fabriqués à partir des matières récupérées ? Où est implantée l'entreprise de recyclage ? etc.).

La politique prix pour une entreprise de recyclage est primordial pour la réussite du démarrage du projet. Elle sert de support pour sélectionner correctement les tarifs des services de gestion des déchets de son entreprise de recyclage.

La politique de distribution pour votre entreprise de recyclage du verre donne l'opportunité de sélectionner les canaux de distribution pertinents afin de commercialiser vos services de gestion des déchets.

La politique de communication de votre entreprise de recyclage du verre va donner la possibilité de sélectionner les canaux, initiatives et stratégies marketing les plus adaptés.

Absolument tous ces éléments qui composent le Marketing Mix d'une entreprise de recyclage du verre font partie de notre étude de marché pour une entreprise de recyclage du verre.

IV.7. Choisir un marché cible :

En réalité, le concept de l'entreprise de recyclage du verre doit être étroitement lié au public cible que vous souhaitez atteindre.

Vous choisirez probablement aussi de vous localiser à proximité des zones industrielles ou des parcs d'affaires.

Choisir votre public cible est crucial car cela détermine de nombreux aspects de votre entreprise de recyclage - des types de services que vous offrez à la façon dont vous communiquez sur votre activité, en passant par l'emplacement de votre entreprise.

De plus, connaître votre public cible vous permet de mieux cibler vos efforts marketing.

Si vous savez à qui vous vous adressez, vous pouvez choisir les canaux de communication les plus pertinents.

IV.8. Choisir un emplacement :

Le choix du bon emplacement pour l'entreprise de recyclage du verre est crucial pour son efficacité opérationnelle et son impact environnemental, et cela nécessite une évaluation minutieuse de plusieurs facteurs clés.

Comprendre le tissu industriel et commercial local est essentiel. Identifier les entreprises et les industries dans votre région qui génèrent des déchets recyclables vous permet de cibler vos services de manière stratégique.

Si la région abrite de nombreuses entreprises manufacturières, par exemple, il peut y avoir une abondance de matériaux spécifiques à recycler.

Un emplacement avec des connexions routières solides peut réduire les coûts de transport de votre entreprise. La proximité des autoroutes et des routes principales facilite le transport des matériaux recyclables depuis et vers votre site.

La taille et la configuration du site sont également importantes.

Vous aurez besoin d'un espace suffisant pour le tri, le stockage et le traitement des matériaux recyclables, ainsi que pour le stationnement des véhicules de collecte et de livraison.

Un emplacement dans une région en développement peut offrir des opportunités d'expansion et une augmentation de la demande pour les services de recyclage.

La proximité des centres de population est importante pour les programmes de recyclage résidentiel.

Un site facilement accessible pour les résidents augmente la probabilité de participation au programme de recyclage [22].

IV.9. Marché national :

Parmi les sociétés au niveau national utilisent le calcin comme matière première :

IV.9.1. Société MFG :

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

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

Le complexe est implanté au niveau du site de l'Arbaa dans la wilaya de Blida et a nécessité un investissement de 100 Millions d'Euros. Il fait partie d'un grand projet constitué de 3 lignes de

production de verre plat d'une capacité totale de 642 400 tonnes par an et de 5 usines de transformation de verre.

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

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

Nous pouvons donc dire que MFG est le leader du verre sur le marché national, dans la mesure où il détient le quasi-monopole sur l'ensemble du territoire national [23].

IV.9.2. Société AFRICAVER :

La société africaine du verre « AFRICAVER » dont le siège social se situe au niveau de la zone industrielle d'Ouled Salah dans la commune de Taher, est une entreprise publique économique et filiale de la société mère ENAVA (Entreprise nationale des verres et abrasifs). Le projet de la verrerie a été lancé en 1983. Les travaux de construction achevés en 1985. L'usine est entrée en production le 1^{er} août 1987, les effectifs s'élevaient à environ 700 personnes. Durant les années 90, l'usine a connu un arrêt prolongé et la production n'a repris que vers 1997. Il faut noter que l'entreprise s'appelait initialement Complexe Verre de Jijel (CVJ). AFRICAVER produit principalement le verre imprimé, le silicate de sodium et le verre de sécurité. Elle emploie actuellement environ 280 personnes [24].

IV.9.3. Société COMAVER :

COMAVER est une entreprise algérienne leader dans la production et l'exportation du verre située dans la zone industrielle Bannoura Ghardaïa. S'est imposée par la qualité et la diversité de ses produits, ainsi que par les services qu'elle apporte à ses clients.

Elle a été fondée en 1980 et institution ayant une expérience dans l'industrie du verre, occupant une position de premier plan sur le marché algérien ainsi qu'exporter ses produits vers d'autres pays.

L'entreprise répond aux besoins de ses clients depuis plus de 30 ans et sa commercialisation locale s'est déroulée dans les wilayas : Biskra, Oran, Ain Saleh, Tamanrasset, Sétif, Ain Amenas, Djelfa, Ouled Jalal.

Elle exporte désormais ses produits verriers vers les pays : Mali, Mauritanie, Libye, Nigeria et Tunisie.

L'institution produit du verre pressé, ou ce qu'on appelle du verre de table, qui est considéré comme l'activité de l'institution.

La variété des produits offre aux clients plus de choix concernant divers produits. Ces produits sont utilisés dans les bâtiments et nos usages quotidiens [25].

IV.9.4. Société NOVER :

NOVER est une entreprise nationale des verres et abrasifs, la nouvelle verrerie de CHLEF (NOVER) fut fondée il y a plus de 28 ans, afin de répondre à la forte demande nationale en emballage verre pharmaceutique. C'est ainsi que cette société par action est devenue un partenaire privilégié des grandes entreprises pharmaceutiques algériennes.

Située dans la région de Chlef, à l'ouest d'Alger, NOVER est spécialisée dans le verre flaconnage et le verre pressé. Elle est dotée d'un capital de 5.000.000 DA et a pour principaux actionnaires : ENAVA (82,16%), SAIDAL (4,46%), ERCO (4,46%), ECDO (4,46%) et ENAB (4,46%). La capacité de production actuelle de NOVER est estimée à 26.000 tonnes de verre par an.

En effet, grâce à des installations répondant aux normes internationales, des équipements de production modernes et sophistiqués, des outils de contrôle de la qualité ainsi qu'un personnel jeune, dynamique et qualifié, NOVER possède des atouts hors-pairs faisant de cette société un leader dans le domaine du flaconnage en Algérie.

Les activités principales:

- Production d'emballages : bouteilles et bocaux pour jus, limonade confitures, miel, etc..., destinés à l'industrie agroalimentaires.
- Production de flacons et piluliers destinés à l'industrie pharmaceutique.
- Production de verre de table (assiettes et Gobelets).

L'entreprise développe une activité secondaire consistant en l'extraction et traitement de sable siliceux destiné aux fonderies, céramique et verreries [26].

IV.9.5. Société ALVER :

Alver Spa est une entreprise filiale du Groupe Condor qui se positionne en leader dans la production et la commercialisation d'emballage en verre creux en Algérie.

Avec un tonnage très important par an, la production d'Alver couvre en majeure partie le marché local du conditionnement.

Alver spécialisation dans ce secteur nous permet de prendre en charge vos attentes sur l'emballage de tous les segments :

- Soda
- Jus
- Huiles
- Pot et conserves [27].

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

En conclusion, la présente étude a démontré l'importance du recyclage du verre en Algérie, soulignant les nombreux avantages environnementaux et économiques de ce processus. Nous avons exploré les aspects historiques, techniques et économiques de la production et du recyclage du verre, en examinant les défis rencontrés dans la mise en place d'une filière de recyclage efficace.

L'étude a mis en évidence la nécessité d'investissements dans des infrastructures adéquates, notamment des centres de tri et de recyclage, ainsi que la promotion de la sensibilisation du public au tri sélectif. Le développement de nouvelles applications pour le verre recyclé, comme son utilisation dans les travaux publics, offre un potentiel important pour la valorisation de ce matériau.

L'intégration de la technologie, l'encouragement des initiatives locales et la collaboration entre les différents acteurs de la chaîne de valeur sont essentiels pour réussir la transition vers une gestion durable des déchets en Algérie.

L'étude fournit une base solide pour la conception et l'implémentation de politiques et de stratégies visant à améliorer le recyclage du verre et à promouvoir un développement durable dans le secteur.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] S SAIDI , CHAPITRE I GENERALITES SUR LES VERRES , Université Mohamed Khider de Biskra, 2007,
- [2] BELABED Tayeb et BEKAKRIA Thbet, Elaboration et étude des propriétés physico-chimiques du verre sodocalcique de l'industrie du verre MFG Algérie, Université 8 Mai 1945 Guelma,2022
- [3] Site internet : <https://alver.dz/about.php>
- [4] BOUZIANE BACHIR et FENDIL AMIRA, Etude du comportement des argiles stabilisées avec des déchets de verre, UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET,2020
- [5] LAICHAOUI SARAH et LEMOU ZOHRA, Elaboration et caractérisation d'un verre du système ternaire $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{ZnO}$, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA -BOUMERDES,2015
- [6] Slimane BOUDJELLAL et Mohamed LAZZOUZI, Plan de redéploiement stratégique Application à l'industrie du verre – Entreprise : MFG, Ecole Nationale Polytechnique Département de Génie Industriel,2015.
- [7] Hamid Zeroub et Mohamed Larbi, Le verre dans le bâtiment, Université Mhelmed Bougara Boumerdes
- [8] AMIROUCHE Ahmed Razik, Étude du verre Float de l'industrie verrière Mediteranean Float Glass "MFG" Algérie, Université 8 Mai 1945 Guelma,2020.
- [9] N. Bensalem, Mémoire de fin d'étude, « Étude de l'influence de la température sur la qualité du verre Float », École Nationale Supérieure Des Mines et Métallurgie d'Annaba, Juin 2016.
- [10] Chahira Boukharouba, Etude de la corrosion des verres d'AFRICAVER-Jijel : Etude du phénomène de lixiviation, Université du 8 Mai 1945 Guelma, Juin 2018.
- [11] BOUZIA Khaoula et KLALIB Qamar, Étude et caractérisation des défauts issus du bain d'étain et amélioration du rendement de la production, Université Saad DAHLEB BLIDA 1, 2022.
- [12] Belhadj Asma & Hassaine Atika, Caractéristiques calorimétriques et physique des verres à base d'oxyde d'antimoine, Université Mohamed Khider de Biskra, 2018
- [13] Rouag Chafia, Etude les propriétés optiques des verres $\text{Sb}_2\text{O}_3-\text{Na}_2\text{O}-\text{WO}_3$ dopé par Er^{+3} , Université Mohamed Khider de Biskra,2021.
- [14] GUEZZOUN HANANE, Etude physico-chimique et spectroscopique de l'ion de cobalt dans les verres $\text{Sb}_2\text{O}_3-\text{Li}_2\text{O}-\text{WO}_3$, UNIVERSITE KASDI MERBAH - OUARGLA,2012.
- [15] LARGOT HANANE, Synthèse et caractérisation des verres phosphates dopés Sm^{+3} et codopés $\text{sm}^{+3}/\text{AgNPs}$, UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA,2020.
- [16] ALOUK AMMAR ABD RAOUF et MESSAT ISSAM, Valorisation Des Déchets de verre dans un matériau composite, UNIVERSITE KASDI-MERBAH OUARGLA,2021.

- [17] Jonathan Decottignies, la collecte ,le tri et le recyclage du verre des dechets menagers et assimilés, Cercle National du Recyclage,2008.
- [18] Amrous warda et belkada nabil, étude la filiere du recyclage du verre a l'unité alverdoranet proposition du piste d'amélioration our une gestion plus responsable et durable mémoire master, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2015
- [19] LEGHREIB Mekki Nour El Islam et LEGHREIB Mekki Nour El Islam, Etude des bétons à la poudre de verre, Ecole Nationale Polytechnique,2015.
- [20] Brahim DJEMACI, La gestion des déchets municipaux en Algérie : Analyse prospective et éléments d'efficacité, thèse doctorat, UNIVERSITE DE ROUEN, 2012.
- [21] KORTI Yousra, Procès de fabrication du verre, Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira,2020.
- [22] Site internet : <https://modelesdebusinessplan.com/blogs/infos/recyclage-etudemarche,26.05.2024>
- [23] Site internet : <https://mfg.dz,26.05.2024>
- [24] Redjati hamza et Abbas Hiba,Etude physico-chimique du verre imprime et de silicate de sodium,université 08 mai 45 guelma,2013.
- [25] Site internet : <https://comaver.net,26.05.2024>
- [26] Site internet : <https://nover.dz,26.05.2024>
- [27] Site internet : <https://alver.dz,26.05.2024>
- [28] Khelfa amir et Boudjemia redouane, Etude physico-chimique de la durabilite des verres, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa,2019.