

N° Ordre ...../FSI/UMBB/2017

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté des sciences de l'ingénieur

## Mémoire de master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

**Filière : Génie des matériaux**

**Option : contrôle qualité des matériaux**

# Thème

**« CARACTERISATION D'UN  
VERRE PLAT FLOAT GLASS  
ERODE PAR SABLAGE »**

**Présenté par :**

**-Hadj Amar Mohamed**

**-Hammouda Ahmed**

**Proposé et suivi par :**

**-Dr ABOUTALEB DJAMILA**

**Année Universitaire : 2016-2017**

## *REMERCIEMENT*

*Ce travail a été réalisé aux laboratoires de génie des matériaux  
université de Boumerdes*

*Tout d'abord, nous tenons à remercier le bon Dieu pour nous avoir  
donné le courage et la santé à finaliser ce travail.*

*Nous tenons à présenter nos sincères remerciements et notre gratitude  
à promotrice:*

*Madame ABOUTALEB DJAMILA pour sa disponibilité, son aide  
précieuse, son soutien tout au long de ce travail et ses conseils qui  
nous ont été très utiles.*

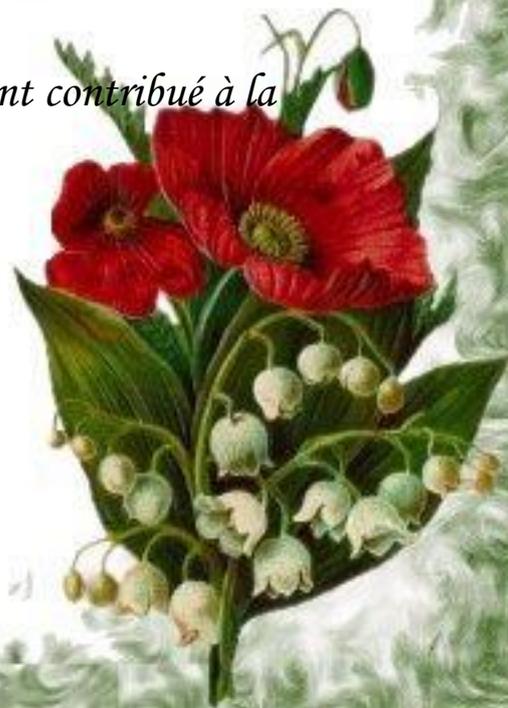
*Nous remercions également tous les membres du jury qui ont examiné  
ce travail avec bienveillance pour nous avoir fait l'honneur de  
présider le jury qui ont eu l'amabilité de juger ce modeste travail.*

*Un grand merci à Monsieur SAFI en particulier pour son aide  
précieuse.*

*Monsieur, AIT HACENE SAID et Madame, TURKI pour faire les  
essais de flexion et Madame, BOUDALI NABILA pour faire Les  
essais de délatation et la masse volumique et Monsieur, CHOAIB et  
Monsieur, KARI*

*Sans oublier Monsieur, KAMAN TOUFIK et pour tout les  
personnels de centre MFG Blida*

*Merci à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la  
réalisation de ce mémoire*



# « DEDICACE »

*Je dédie ce modeste travail à :*

➤ *Mes parents qui m'ont soutenu et encouragé  
durant toute ma vie .*

➤ *Ma famille et mes amis*

➤ *A mes camarades , pour son aide et son  
soutien au cours de la réalisation de mon  
travail.*

*A qui je témoigne toute ma reconnaissance et  
mes sincères remerciements*

*A toute la promotion MCQ15*

*HADJ AMAR MOHAMED*



# « DEDICACE »



*Je dédie ce modeste travail à :*

➤ *Mes parents qui m'ont soutenu et encouragé  
durant toute ma vie .*

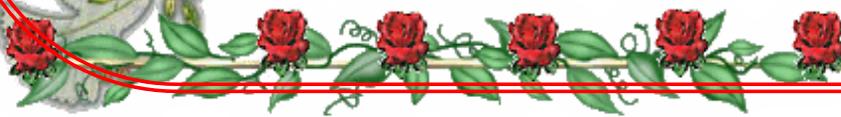
➤ *Ma famille et mes amis*

*ENFIN A tous les personnes qui ont contribué de  
près*

*De loin à la réalisation de ce travail.*

*A tout le groupe de MCQ15*

*HAMMOUDA AHMED*



## Partie théorique

### Chapitre I : Généralités sur les verres

I- Introduction.....	1
II- Généralités sur les verres .....	1
III- Historique .....	2
IV. Composition des verres .....	2
V .Structure du verre .....	4
V.I. Classification des verres.....	7
V.I .1 Verres naturels.....	7
V.I .2 Verres artificiels .....	8
V.I .2 .a Les verres d'oxydes .....	8
V.I .2 .b Verre d'halogénures .....	9
V.I .2 .c Les verres métalliques .....	9
VII. Propriétés des verres .....	9
VII.1-Propriétés rhéologiques .....	9
VII.1. a La viscosité du verre .....	9
VII.1. b La tension superficielle .....	12
VII.2 Propriétés mécaniques .....	13
VII.2. a La dureté.....	13
VII.2. b La résistance mécanique .....	13
VII.3 Propriétés thermiques.....	15
VII. 3.a Chaleur spécifique.....	15
VII. 3.b -Conductibilité thermique .....	16
VII. 3.c -Dilatation thermique .....	17
VII. 4 Propriétés optiques du verre.....	19
VII. 4.a Réfraction.....	19
VII.4.b Transmission optique .....	21
VII.5 Propriétés électriques .....	22
VII.6 Propriétés chimiques.....	23
VIII.Fabrication des verres (verre plat, verre creux).....	24

VIII.1 Procédés de fabrication du verre plat .....	25
VIII.1.A -Procédé de flottage (FLOAT GLASS).....	25
VIII.1.B Le procédé Fourcault .....	27
VIII.1.C Le procédé Pittsburgh .....	28
VIII.1.D Le procédé Colburn (Libby –Owens) .....	28
VIII.1.E L'étirage vers le bas .....	29
VIII.2 Procédés de fabrication du verre creux : .....	29
VIII.2.a Formation de la paraison.....	31
VIII.2.b Formage de l'article.....	31

## **Chapitre II : L'érosion du verre**

II. Erosion du verre.....	35
II. 1 Introduction.....	35
II.2 Principe de l'essai d'érosion par des particules solides.....	35
II.3 Mécanisme de l'érosion .....	36
II.3.a Matériaux ductiles.....	36
II.4 Paramètres influants sur l'érosi.....	40

### **PARTIE PRATIQUE**

I. Objectif du travail .....	41
II. Moyens utilisés .....	41
III. Essais de caractérisations .....	43
III.1. Détermination de la masse volumique (Masse volumique hydrostatique)...	44
III.2. Détermination de la masse spécifique . .....	45
III.3. Détermination de l'absorption d'eau. ....	46
III.4. Détermination de résistance chimique .....	46
III.5. Détermination de la résistance au choc thermique .....	47
III.6. Détermination de la résistance mécanique (Résistance à la flexion) .....	48
III.7. Détermination de la dilatation thermique .....	49
III.8. Détermination de la transmission optique .....	51
III.9. Détermination de la dureté des verres .....	53
III.10. Aspect des échantillons .....	54

IV. Résultats des essais réalisés.....	57
IV.A°. Caractérisation des échantillons de verre avant sablage .....	57
IV.A.1 La masse volumique (hydrostatique) .....	57
IV.A.2 La masse spécifique.....	58
IV.A.3. Détermination de l'absorption d'eau: .....	59
IV.A.4. Détermination de résistance chimique : .....	60
IV.A.5. Détermination de la résistance au choc thermique : .....	61
IV.A.6. Détermination de la résistance mécanique (Résistance à la flexion) : ....	62
IV.A.7. Détermination de la dilatation thermique : .....	64
IV.A.8. Détermination de la transmission optique .....	65
IV.A.9. Détermination de la dureté des verres .....	67
IV.B°. Caractérisation des échantillons sablés par sableuse .....	67
IV.B.1 La masse volumique (hydrostatique).....	67
IV.B.2 La masse spécifique.....	69
IV.B.3. Détermination de l'absorption d'eau: .....	70
IV.B.4 Détermination de la résistance chimique:.....	71
IV.B.5. Détermination de la résistance au choc thermique : .....	72
IV.B.6. Détermination de la résistance mécanique (Résistance à la flexion) .....	73
IV.B.7. Détermination de la dilatation thermique : .....	74
IV.B.8. Détermination de la transmission optique .....	77
IV.B.9 Détermination de la dureté des verres .....	79
IV.C°. Caractérisation des échantillons sablés par le dispositif de sablage fabriqué au niveau du laboratoire (UR .MPE ) .....	80
IV.C.1 La masse volumique (hydrostatique).....	80
IV.C.2 La masse spécifique.....	82
IV.C.3. Détermination de l'absorption d'eau: .....	83
IV.C.4 Détermination de la résistance chimique:.....	84
IV.C.5. Détermination de la résistance au choc thermique : .....	89
IV.C.6. Détermination de la résistance mécanique (Résistance à la flexion) : ....	89
IV.C.7. Détermination de la dilatation thermique : .....	92
IV.C.8. Détermination de la transmission optique .....	95

**Conclusion générale**

**Bibliographique**

# Introduction générale

---

## Introduction générale :

Le verre est un matériau amorphe qui est présent presque dans tout les domaines, soit par son emploi comme verre plat ou comme verre creux (construction, médecine, recherche, automobile, décoration, emballage,...) ou sous forme de fibres (fibre optique)

L'industrie verrière ne cesse de se développée et les propriétés remarquables de ce matériau lui confèrent une grande importance dans le secteur industriel.

Le verre plat est largement utilisé dans le secteur de construction et de l'automobile ; sa transparence, sa dureté et sa forme font des paramètres majeurs pour ce choix.

Parmi les problèmes rencontrés lors de l'utilisation du verre dans l'automobile, on rencontre souvent des problèmes liés a la nuisance de l'état de surface donc de la vue des pare brises des véhicules qui ont été exposée aux différentes agressions extérieures selon les conditions climatiques et environnementales de chaque région géographique (vent de sable, poussières et grêles...).

Dans les régions Sahariennes, les vents de sable et la poussière affectent énormément la surface externe des pare-brises des véhicules. Cet inévitable phénomène provoque la diffusion d'une lumière parasite dans le champ de vision des conducteurs. Cette dernière nuit à la bonne vision des conducteurs de véhicules qui circulent particulièrement la nuit, la levée et le coucher du soleil. Les objets vus à travers les pare-brises dégradés deviennent partiellement ou parfois complètement flous. Ainsi, la vision à travers ces pare-brises endommagés constitue un facteur accidentel pour les conducteurs de véhicules.

Dans les régions Sahariennes le phénomène du vent de sable est souvent rencontré et la vitesse maximale de ce vent peut atteindre les 120Km /h [1], ce phénomène naturel peut malheureusement éroder le verre et de ce fait peut attaquer la surface externe du verre et par conséquent la transparence et la visibilité de cette surface diminuent.

Nous avons pensé à caractérisé un verre plat « Float glass » fabriqué à l'unité MFG (Méditerranéen Float Glass) de Larabaa (Blida, Algérie) après son usure érosive par le sable pour voir son influence sur l'état de surface et la variation des propriétés du verre qui ont découlent, à la suite de ce procédé assimilé au phénomène naturel du vent de sable.

Ce mémoire est composé des chapitres suivants :

# Introduction générale

---

Introduction générale

Partie théorique

Chapitre I : Généralités sur les verres

Chapitre II : L'érosion du verre

Chapitre III : Partie pratique

Conclusion générale et perspectives suivies d'une partie bibliographique.

## I- Introduction :

Matériau universel et noble, le verre est présent dans de nombreuses industries : agroalimentaire (bouteilles et pots), automobile (pare-brises et vitres), bâtiment (portes et fenêtres), optique (lunetterie, microscopie), fibres optiques de télécommunication, ... sans compter les innombrables applications des verres spéciaux. Si l'apparition des premiers verres sur terre est de ces histoires aussi anciennes que celle de notre planète, son développement industriel a été fortement mécanisé depuis la révolution industrielle du dix-neuvième siècle. Pour garantir ses spécificités techniques, le suivi des fabrications et les contrôles de qualité sont essentiels, ainsi qu'une optimisation de la production, tant dans un contexte de productivité maximale que pour faire face à l'élasticité de la demande.

## II- Généralités sur les verres :

Depuis sa création, le verre a servi dans le bâtiment, pour faire des fenêtres bien sûr mais aussi comme matériau même de construction. On l'a utilisé pour son esthétisme au début du siècle pour faire des halls de gars , ou en 1988 dans la construction de la Pyramide du Louvre ou encore à l'extérieur de la plupart des nouvelles tours de bureaux. On l'utilise aussi pour ses autres caractéristiques phoniques ou thermiques pour la fabrication de serre par exemple, les verres représentent jusqu'à 80% de la surface d'un immeuble. Le verre est un matériau recyclable et qui a un faible impact sur l'environnement. Les matières premières entrant dans sa composition sont disponibles en abondance. Ce matériau est en outre facilement recyclable. Les principales matières premières entrant dans la fabrication du verre sont le sable (apportant de la silice  $\text{SiO}_2$ ), le carbonate de soude et le calcaire, qui constituent généralement plus de 85 % du mélange. Entrent également dans la composition des additifs pour dégazer le verre (comme par exemple le sulfate de soude) ou accélérer la température de fusion. D'autres additifs peuvent aussi apporter une propriété particulière comme la couleur qui est donnée par les oxydes métalliques présents comme impuretés dans les matières premières ou apportées intentionnellement. Les oxydes de fer et de chrome apportent une couleur verte, ceux de nickel : grise, ceux de manganèse : violette, ceux de cobalt : bleue, ceux de cuivre : rouge ou verte... La couleur ambre, qui protège des rayonnements UV, est donnée par des sulfures de fer (III), en milieu réducteur.

### III- Historique :

Le verre est considéré comme l'un des plus anciens matériaux façonnés par l'Homme. L'origine de la fabrication du verre demeure à nos jours une énigme. D'après les spécialistes, les objets en verre les plus anciens qui ont été découverts, comme les glaçures de céramiques, datent du VII<sup>e</sup> siècle av. J.-C. On peut parler d'une véritable activité de production à partir de 3500 av. J.-C., sous la forme de perles de verre, puis de bagues et de petites figurines fabriquées à l'aide de moules. La technique à base de sable fut développée vers 1500 av. J.-C. Cette technique consistait à plonger, dans la masse en fusion, un noyau céramique fixe sur une baguette comme forme négative, puis à le faire tourner autour de son axe jusqu'à ce que la masse de verre visqueuse y adhère fermement. La masse obtenue était alors roulée sur une plaque jusqu'à obtenir la forme souhaitée. Le matériau était ensuite refroidi, le noyau retiré et l'objet en verre brut affiné par polissage et meulage.[2]

À cette époque, cette technique permettait de créer de petits vases, récipients et coupes qui étaient certes encore opaques, mais qui étaient colorés. La teinte était obtenue par les combinaisons cuivre-cobalt dans la masse en fusion. Vers 1000 av. J.-C., l'art du vitrier était répandu dans la vallée du Nil, d'Alexandrie à Luxor, entre l'Euphrate et le Tigre, en Irak, en Syrie, à Chypre ainsi qu'à Rhodes. Cela a donné naissance à une sorte d'industrie du verre préhistorique.

### IV. Composition des verres :

Le verre est un matériau inorganique, composé de nombreux oxydes, mais le plus souvent élaboré à partir de 3 constituants de base [3-4]:

- l'oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) ou silice, élément majoritaire, et véritable formateur du réseau vitreux
- l'oxyde de sodium ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), appelé fondant, provenant de la décomposition de carbonates synthétiques et qui va transformer la silice en silicate par attaque chimique
- l'oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ), appelé stabilisant, issu de la décomposition de  $\text{CaCO}_3$ .

Pour de nombreux verres industriels (verre d'emballage et verre plat) ces 3 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 ( $\text{K}_2\text{O}$ ), et l'oxyde de calcium par l'oxyde de magnésium ( $\text{MgO}$ ). D'autres éléments, appelés *additifs*, sont ajoutés au verre pour apporter des propriétés bien spécifiques en fonction des applications envisagées:

## CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES VERRES

- 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 ( $Fe_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $CoO$ ,  $CuO$ , 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 de champagne, du verre cristal pour la fabrication d'objets de luxe et d'un verre borosilicate très résistant chimiquement et thermiquement pour la pharmacie.

**Tableau I.1** : Compositions chimiques de quelques verres industriels [4].

	<b>Verre champagne</b>	<b>Verre cristal</b>	<b>Verre borosilicate pharmaceutique</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>72,0</b>	<b>59,6</b>	<b>74,8</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>1,7</b>		<b>6,2</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>0,3</b>		
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>0,2</b>		
<b>CaO</b>	<b>11,0</b>	<b>1,3</b>	<b>0,5</b>
<b>BaO</b>			
<b>MgO</b>	<b>1,0</b>		
<b>ZnO</b>			
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>13,2</b>	<b>3,3</b>	<b>7,5</b>
<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>0,4</b>	<b>10,9</b>	<b>0,8</b>
<b>B<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>			<b>10,5</b>
<b>PbO</b>		<b>24,4</b>	
<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>0,1</b>		

### V .Structure du verre

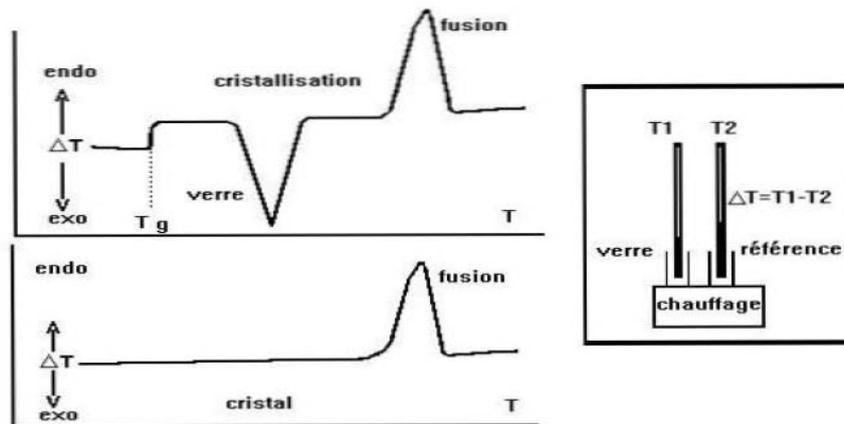
Les verres, matériaux non cristallins, obtenus après refroidissement du liquide, sont amorphes aux rayons-X.

## CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES VERRES

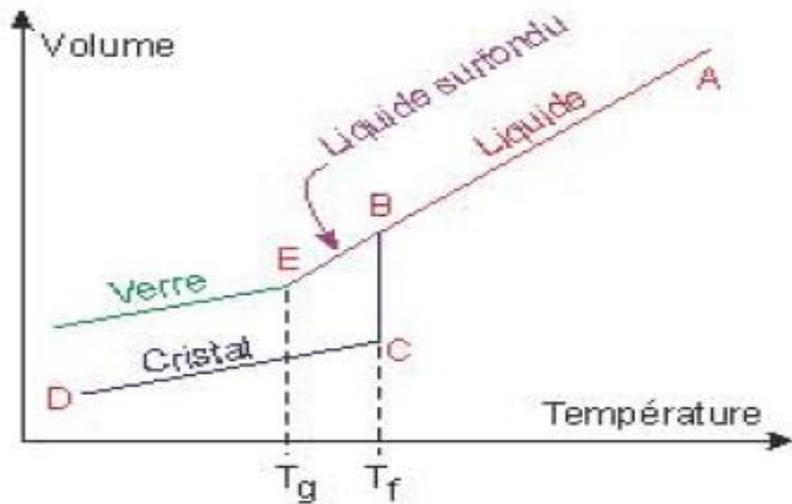
En outre, ils possèdent une caractéristique qui les distingue des autres MNC (Matériaux Non Cristallins) : ils présentent une transition particulière à une température appelée température de transition vitreuse notée ( $T_g$ ). Celle-ci peut être observée en soumettant un échantillon de verre à l'Analyse Thermique Différentielle (Figure I.1). Trois températures typiques sont mises en évidence. En augmentant la température, un phénomène endothermique se produit, il correspond à la température de la transition vitreuse. Il est suivi par la cristallisation du verre (exothermique) puis par la fusion (endothermique) des produits formés lors de la cristallisation. Si un matériau non-cristallin présente une telle transition vitreuse, on dira qu'il s'agit d'un matériau vitreux.

Cette définition n'est pas aussi limpide qu'il y paraît, certains matériaux appelés verres, ne présentent pas de températures de transition vitreuse  $T_g$ . C'est le cas des verres métalliques, MNC obtenus par hypertrempe. Dans ce cas, il arrive fréquemment que la différence entre la  $T_g$  et la température de cristallisation soit voisine de zéro ; la transition vitreuse sera donc masquée et on ne pourra l'observer.

La formation du matériau vitreux se fait essentiellement par trempe. Cette technique consiste à chauffer le matériau considéré jusqu'à sa température de ramollissement puis à refroidir rapidement sa surface externe. La courbe, obtenue par un dilatomètre (Figure I.2) lors du refroidissement du matériau, montre qu'au point B, il se produit une brusque variation du coefficient de dilatation lors de la formation d'un cristal. Par contre, pour la formation du verre, le liquide passe par une phase surfondue (liquide dans le domaine solide).



**Figure I.1:** Schématisation d'une Analyse Thermique Différentielle d'un échantillon vitreux et cristallin [2]



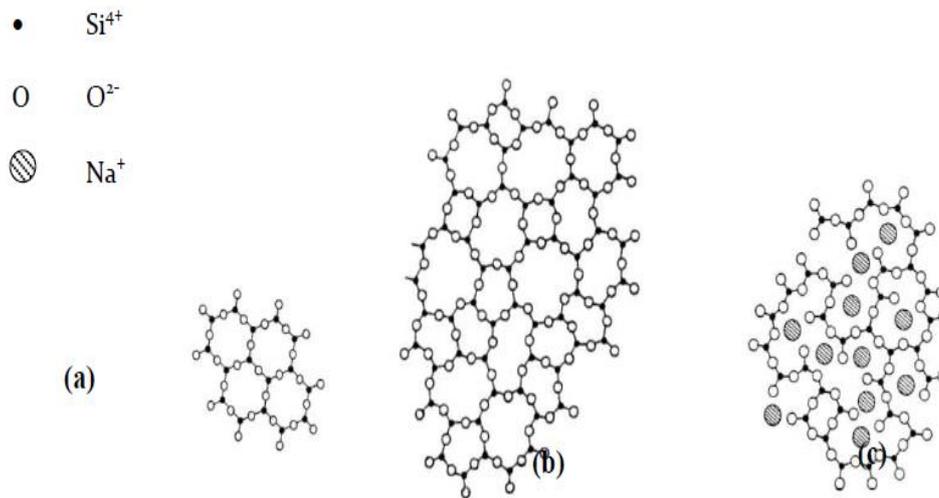
**Figure I.2:** Variation du coefficient de dilatation d'un verre et d'un cristal en fonction de la température lors du refroidissement [2]

$T_g$  = Température de transition vitreuse

$T_f$  = Température de fusion

Le solide obtenu après trempe, contrairement au cristal (Figure I.3a), possède une structure désordonnée et dépourvue d'ordre à longue distance (Figure I.3b et c). Il possède ainsi les caractéristiques de l'état liquide stable à haute température. La transition vitreuse n'est donc pas une transition de phase au sens thermodynamique du terme, mais elle correspond plutôt à un blocage des mouvements de translation des atomes ou des molécules, qui permet de figer la structure de l'état liquide. La transition vitreuse peut être observée au cours du refroidissement de substances très variées telles que :

- Les éléments vitrifiant naturellement (P, S, Se)
- Les oxydes ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ , ...)
- Les halogénures (As-S, As-Se, P-Se, ...)
- Les sels fondus ( $\text{KNO}_3$ - $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{KHSO}_4$ , ...)
- Les solutions aqueuses ( $\text{H}_2\text{S}_4$ ,  $\text{KOH}$ , ...)
- Les composés organiques (méthanol, éthanol, ...)
- Les polymères organiques (polyéthylène, polystyrène, ...)
- Les métaux (alliages métal-métalloïde, PdSi, FeB ou métal-métal, NiNb, CuZn, ...)



**Figure I.3:** Schémas en deux dimensions des réseaux de silice, la quatrième liaison Si–O se place perpendiculairement au plan de la figure [2]

(a) Réseau ordonné – (b) Réseau désordonné – (c) En présence de cations  $\text{Na}^+$

Pour les verres d'oxydes qui nous intéressent plus particulièrement, la vitrification est principalement favorisée par la viscosité élevée du liquide. De nombreuses théories ont été élaborées pour tenter d'expliquer et de prévoir le processus de vitrification. Goldschmidt en 1926 fut le premier à proposer un critère empirique basé sur le rapport des rayons atomiques des cations et des anions constituant le matériau vitreux. Dans le cas des verres d'oxydes, il postula que le rapport  $r_{(\text{anion})}/r_{(\text{cation})}$  doit être compris entre 0,2 et 0,4. Or d'après les considérations classiques de cristallographie, pour des structures ioniques le rapport  $r_{(\text{anion})}/r_{(\text{cation})}$  est en relation directe avec le nombre de coordination du cation central. L'intervalle proposé implique alors une coordination tétraédrique. Zachariasen, observant des spectres très étalés de diffraction X des verres, avait suggéré qu'ils devaient être constitués d'une sorte de molécule géante formant un réseau désordonné d'atomes. Ce réseau tridimensionnel serait responsable de la viscosité très élevée du liquide précurseur. Zachariasen [3] porta son attention sur les verres à base d'oxydes. Comme la tendance à la cristallisation y est faible, il en conclut que l'excès de l'énergie interne par rapport au cristal doit être limitée et que les arrangements atomiques dans le cristal et dans le verre doivent être similaires. Il avait remarqué que les cristaux ioniques qui donnent facilement naissance à un verre ont une structure très ouverte. Le cation y est petit et porteur d'une charge élevée. Il est généralement entouré d'oxygènes formant un polyèdre qui partage chacun des sommets avec un polyèdre voisin. Zachariasen pensa que cette caractéristique devait s'appliquer aux verres. Il formula un ensemble de quatre règles topologiques auxquelles un oxyde doit satisfaire pour former isolément un réseau vitreux :

- Les atomes d'oxygènes entourant un cation forment un polyèdre qui ne doit comporter qu'un petit nombre d'atomes (3 ou 4).
- Aucun atome d'oxygène ne peut être lié à plus de deux cations.
- Les polyèdres ont en commun un sommet mais jamais des arêtes ou des faces.

- Chaque polyèdre partage au moins trois sommets avec ses voisins. Il semble que les quatre règles de Zachariasen ne soient pas d'égale importance. Selon Cooper, seules les règles 1 et 2 sont essentielles. Par exemple, lorsque les polyèdres sont des tétraèdres, ceux-ci peuvent partager avec leurs voisins une arête et deux sommets opposés.

Un certain nombre de règles semi-empiriques ont été proposées pour relier l'aptitude à la vitrification à la nature de la liaison interatomique. Smekala estimé que la présence des liaisons mixtes est indispensable pour pouvoir édifier un arrangement désordonné. Stanwortha [3] indiqué pour les oxydes une corrélation quantitative entre le degré de covalence de la liaison A–O et l'aptitude de l'oxyde à vitrifier. D'après les idées de Pauling, la différence des valeurs de l'électronégativité de deux éléments permet d'estimer le pourcentage d'ionicité de la liaison. Plus petite est cette différence plus la liaison a le caractère covalent. Sun a tenté de relier l'aptitude à la vitrification à la force de liaison. La force de la liaison M–O a été calculée en divisant l'énergie de dissociation  $E_d$  de l'oxyde cristallin en ses éléments à l'état de vapeur par le nombre des atomes d'oxygènes entourant l'atome M dans le cristal (ou dans le verre), c'est-à-dire par son nombre de coordination.  $E_d$  a été évalué à partir des mesures spectroscopiques. Les valeurs obtenues permettent de constater que la force de liaison dans les oxydes formateurs dépasse 90 Kcal/mol et qu'elle est inférieure à 60kcal/mol pour les modificateurs. Dans l'utilisation de ce critère, il faut que toutes les liaisons soient de même type.

Rawson a amélioré le critère de Sun en remarquant que pour relier la faculté de vitrifier à la possibilité de rompre la liaison à la température de fusion, il faut non seulement prendre en considération la force de liaison mais aussi tenir compte de la quantité d'énergie thermique disponible pour la rompre. La température de fusion constitue une mesure de la quantité d'énergie disponible. Rawson a finalement proposé de considérer comme critère de formation des verres le paramètre obtenu en divisant la force de liaison par la température exprimée en Kelvin [3].

### V.I. Classification des verres

On distingue deux groupes fondamentaux :

#### V.I.1 Verres naturels

Ce sont des substances à l'état vitreux existant rarement dans la nature, la vitrification survient en général seulement lorsque la lave fondue arrive à la surface de la croûte terrestre et y subit un brusque refroidissement [5].

On peut citer plus particulièrement les obsidiennes roche éruptives, qui sont des verres naturels ayant une composition voisine de celle des verres industriels.

La formation des verres dans la nature peut être aussi provoquée par des processus engendrant une élévation brusque de la température à la suite des ondes de choc puissantes, par exemple les impacts de météorites.

### V.I.2 Verres artificiels

Ce sont en majorité des verres inorganiques produits industriellement, on distingue :

#### V.I.2 .a Les verres d'oxydes

Parmi les verres inorganiques on trouve les verres d'oxydes surtout de silicates qui sont plus importants.

La grande majorité de ces verres comprend d'oxygène comme anion, lequel comme agent partant dans les liaisons.

Ces oxydes peuvent former le verre soit seuls ont eu combinaison avec un ou plusieurs autre oxydes [4-5].

#### -Verre à un composant

Le verre de silice occupe par sa composition et ces applications techniques, une position remarquable parmi les verres à un constituant « formateur de verre par excellence ». On distingue également le verre de :

- $B_2O_3$  l'anhydride basique
- $P_2O_5$  l'anhydrite phosphorique
- $G_2O_2$ .

#### -Verre formé par l'association de plusieurs formateurs :

Ce sont des verres binaires  $SiO_2$ ,  $B_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $G_2O_2$ ,  $SiO_2$ ,  $P_2O_5$  et  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ .

La structure de ces verres est encore largement inconnue, en particulier il n'est pas définitivement établi s'il y a formation de chaîne mixte. Ou bien celle de micro domaines riches en l'un des composants.

#### -Verre formé par l'association des formateurs avec d'autres oxydes :

Ce groupe rassemble la grande majorité des verres d'oxydes usuels d'adjonction d'autres oxydes qui permet de modifier dans des larges limites les propriétés des divers résultats.

Ils sont de la forme  $SiO_2 - X_2O$ ,  $SiO_2 - RO$ ,  $SiO_2 - X_2O - RO$ , où  $X_2O$  est un oxydes alcalin, et  $RO$  un alcalin - terreux verre d'halogénures et surtout de fluorures.

Le fluorure de béryllium  $BeF_2$  est un formateur de réseau isostructural affaibli de la silice, la structure étant formé de tétraèdres  $BeF_4$ .

#### V.I.2 .b Verre d'halogénures

Les verres de ce groupe sont basés sur les éléments du VI<sup>ème</sup> groupe, peuvent être associé éléments du V<sup>ème</sup> groupe (Si, Ge) de quelques systèmes tels que :

As – X, Ge – X - As, Ge – As – Si, Si – As – X, Ge – P – X.

Les verres de chalcogénures prennent de plus en plus de l'importance vu que leurs propriétés optiques de transmission dans l'infrarouge les qualifient à des applications modernes pointues.

### V.I.2.c Les verres métalliques

On cite deux principaux types [6]:

-Alliage métal – Métalloïde ( $M_1 M_2 \dots$ ) 80 ( $m_1 m_2 \dots$ ).20, ou  $M_i$  est un métal de transition : Au, Pb, Pt, Fe, Ni, Mn et  $m_i$  un métalloïde : Si, Ge, P, C, B.

Le rapport 80/20 est approximatif :

-Alliage métal – métal, par exemple : Mg 65 Cu 35, Sn 90 Cu 10, Zr 50 Cu 50, Ni 60 Nb 40.

Ces verres sont obtenus par trempe ultra rapide d'alliage liquides à l'état de fil ou, de rubans menus leur température de transition est soit plus élevée, soit plus basse que celles des phases cristallines, ils présentent des propriétés mécaniques, et électriques intéressantes [5].

## VII. Propriétés des verres

Le verre est un matériau que l'on rencontre de plus en plus dans la vie courante. Il convient donc de connaître ces propriétés afin de pouvoir l'utiliser de manière ingénieuse [7]

### VII.1-Propriétés rhéologiques

La rhéologie est une science qui étudie les phénomènes de déformation et d'écoulement des solides et des fluides sous l'action des forces extérieures (mécaniques). Les verres par leur structure possèdent un comportement rhéologique très complexe. En effet aux températures très élevées les verres ont les propriétés de liquide visqueux et à des températures inférieures à  $T_g$ , la cohésion est grande, ils ont l'apparence d'un solide élastique.

#### VII.1. a La viscosité du verre

Le verre est un liquide en surfusion qui n'a pas de point de fusion défini comme dans le cas des métaux. Ainsi il se ramollit au fur et à mesure de l'augmentation de la température passant par différents domaines de viscosité, celui étant pas seulement une propriété essentielle pour la fabrication et le formage du verre, mais elle dépend de la nature et la structure du verre. Le phénomène de viscosité est lié avec les forces de frottement entre deux couches de n'importe quel corps. La cause de la viscosité est la transition des particules d'une couche à une autre. La viscosité a la même mesure que la force ( en dynes) qu'il faudrait appliquer à  $1\text{cm}^2$  d'un feuillet du fluide considéré pour le déplacer à une vitesse uniforme de  $1\text{cm/s}$  par rapport à un autre feuillet parallèle situé à  $1\text{cm}$  du précédent.

NEWTON a proposé une formule liant les forces agissantes sur la surface des couches et la vitesse de déplacement des couche l'une par rapport à l'autre. Cette relation se traduit par la formule suivante :

## CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES VERRES

---

$$F = \eta S \frac{dv}{dx} \quad (I.1)$$

$\eta$ : Coefficient de viscosité

F : force agissante sur la couche

S : surface

dv / dx : gradient de déplacement

L'unité de mesure est Pa.S , lorsque la surface de frottement exercée sur une surface de  $1m^2$  et de 1N pour une variation de vitesse  $dv = 1m/s$  sur une distance  $dx = 1m$ . La viscosité cinématique est exprimée comme suite :

$$V = \eta/d$$

V : viscosité cinématique

d : densité

**Tableau I.2 :** Valeurs de viscosité pour les différents régimes d'élaboration et de traitement du verre selon PAVLOUCHKINE

Viscosité (Pa.s)	Les points (procédés)
$10^{19} - 10^{20}$	A Température 18-26°C
$10^{13.5}$	Température < Température de recuisons
$10^{12.3}$	Température de transformation Tg
$10^{12}$	Température > Température de recuisons
$10^7 - 10^8$	Bombage
$10^7$	Combage
$10^{6.6}$	Température de ramollissement
$10^4 - 10^7$	Pressage
$10^3 - 10^6$	Laminage
103	Etirage (procédé fourcault)
$10^2 - 10^{2.5}$	Fabrication manuelle
$10^{1.5}$	Température des liquides
30 - 40	Coulage
10	Température > Température d'élaboration

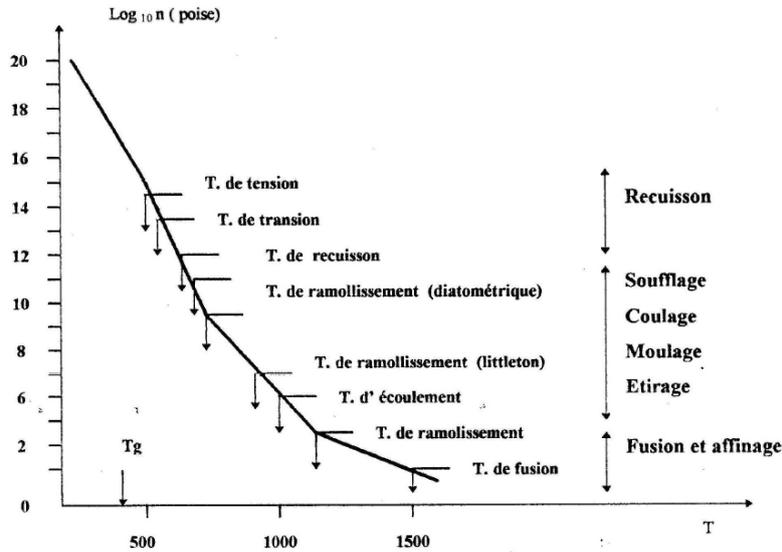
### Dépendance de la viscosité

#### -Influence de la température

La viscosité est un paramètre très important dans le processus d'élaboration du verre. En effet la viscosité conditionne le mode de fabrication des verres industriels celle-ci étant un point primordial. Lorsque la température augmente la viscosité diminue tout d'abord peu, puis plus rapidement et enfin plus lentement pour atteindre, aux températures de fusion une valeur de  $10^{12}$  poises. Ceci peut être expliqué par le fait qu'à haute température le pouvoir de mobilité des éléments structuraux est grand et les forces de liaison tendent à se rompre. Le verre à la température de fusion, la rupture des liaisons est semi totale et qui croit progressivement avec

l'énergie thermique, ainsi il apparaît des fragments de dimensions relativement élevées d'où les déplacements sont limités et ainsi une viscosité élevée. Inversement par refroidissement des liaisons se referment progressivement et la viscosité augmente.

## L'allure thermique de la viscosité



**Figure I.4** L'allure thermique de la viscosité

L'allure thermique de la viscosité est une caractéristique importante dans le processus d'élaboration du verre puisque c'est elle qui détermine le régime de fusion, le recuisson et le mode de façonnage. Cette courbe est caractérisée par la formule suivante :

$$\eta = A \cdot e^{EN/RT} \tag{I.2}$$

$$A = N \cdot h/V$$

Cette formule est valable pour le domaine [Tg-Tf]

A : constante qui dépend de la composition chimique du matériau.

N : nombre d'Avogadro

h : constante de Plank

V : volume molaire du corps

E.N : Energie libre d'activation d'écoulement du verre en [Kj /mol]

R : constante universelle des gaz, R= 8.32 [Kj/ Kmol]

T : Température en [K].

D'autres formules ont été élaborées afin d'approcher au maximum la dépendance de la viscosité en fonction de la température.

## Equation de TAMMAN- FOGEL – FULCHER

$$\log \eta = A + B(t - t_0) \quad (I.3)$$

Cette formule est valable est précise dans l'intervalle de viscosité

A, B, T0 sont déterminées expérimentalement en mesurant trois valeurs de viscosité.

## Equation d'EUSTROPIEV

$$\eta = A e^{\left(\frac{E_0}{RT^2}\right)} \quad (I.4)$$

L'énergie d'activation du flux visqueux est la puissance nécessaire pour former les vides et défauts dans la structure du verre et des particules par rapport aux autres dans les vides.

### **VII.1. b La tension superficielle**

Elle joue un grand rôle lors de la fusion du verre et au cours des étapes de fabrication.

On la définit comme suit:

Une particule située à l'intérieur d'un corps est attirée par toutes les particules voisines, si bien que la résultante est nulle. Si au contraire cette particule se trouve à la surface, il n'y a pas de force de ce côté et il s'en suit une force résultante dirigée vers l'intérieur, pour amener une particule de l'intérieur à la surface, il faut fournir un travail déterminé, les corps ayant une grande surface ont une énergie plus grande et ont tendance à prendre une énergie plus faible en diminuant la surface, les liquides prennent ainsi la forme sphérique.

L'agrandissement d'une particule suppose le transport de particules depuis l'intérieur vers l'extérieur, ce qui exige par conséquent une dépense d'énergie : l'énergie nécessaire pour former une nouvelle surface de  $1m^2$  est dite énergie libre superficielle, elle a pour unité  $[j/m^2]$ . En général, la notion de tension superficielle  $\sigma$  mesurée en N/m est plus courante:

$$\sigma = \frac{A}{S} [j/m^2] \quad (I.5)$$

La diminution de l'énergie superficielle n'a pas seulement lieu physiquement par changement de la forme de la surface mais il peut y avoir aussi une influence chimique par le fait que se rassemblent les particules qui sont liées à l'intérieur par des forces moindres.

### **-Influence de la composition**

La dépendance de la viscosité et de la composition chimique est conditionnée par la rigidité des liaisons chimiques et le degré de cohérence réticulaire.

Lorsqu'on passe des verres à un constituant aux verres à plusieurs constituants, il résulte des considérations structurales que les coupures affaiblissent le réseau, diminuant la viscosité comme c'est le cas des oxydes alcalins qui abaissent la viscosité à toutes les températures.

On effet l'introduction des ions alcalins diminuent brusquement la viscosité à cause du volume des ions  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  qui est petit et ainsi plus mobile.

### **VII.2 Propriétés mécaniques**

#### **VII.2. a La dureté**

La dureté en général est la résistance d'un solide à la pénétration d'une pointe, d'une bille d'un outil, c'est à dire à la déformation de la surface.

Dans l'industrie verrière, la dureté est une des propriétés les plus importantes, c'est une grandeur qui nous détermine les verres durs et les verres tendres. Pour différencier les verres à faible coefficient de dilatation qui se ramollissent à température élevée (verres durs), des verres à coefficient de dilatation élevée (supérieur à  $50 \cdot 10^{-7} \text{ k}^{-1}$ ) qui se ramollissent à température relativement basse (verres tendres).

Le classement des verres, au point de vue de la dureté dépend de la méthode d'essai.

Ces différentes méthodes : rayure, abrasion, empreinte reposent sur des principes différents, elles conduisent donc à des résultats qui ne sont pas comparables. D'autres essais tel que celui du célérimètre ont été faits pour établir un classement plus précis. Ce classement se base soit sur la valeur de la force nécessaire pour créer une rayure de dimension donnée, soit sur les dimensions d'une rayure créée sous l'effet d'une donnée.

#### **VII.2. b La résistance mécanique**

La résistance mécanique d'un matériau, est son aptitude à résister aux forces destructives. Il existe plusieurs types de résistance mécanique selon la nature des forces destructives appliquées, on cite :

##### **-Résistance à la traction**

La limite de rupture à la traction est la charge maximale produisant la rupture au cours d'un essai de traction cette charge étant rapportée à la section de l'éprouvette. Sa valeur est une vingtaine de fois plus faible que celle de la résistance à la compression. Elle dépend de nombreux facteurs :

Dimensions de l'éprouvette.

- Etat de surface de l'éprouvette.
- Température pendant l'essai

- Durée de l'application de la charge

### -Résistance à la flexion

La flexion est la méthode la plus apte à la mesure de la résistance du verre, en comparaison avec la traction qui provoque des tensions pendant le démarrage des machines de traction. Par contre pour la flexion l'échantillon ne subit aucune tension causée par serrage.

Pour le verre ordinaire, elle a une valeur faible allant de 0,03 à 0,12 Gpa. On doit, cependant, faire la distinction entre la résistance théorique et pratique. La constante de proportionnalité E qui apparaît dans cette équation est appelée module de YOUNG ou module d'élasticité.

### -Caractéristiques mécaniques en fonction de la température

À température ambiante, loin de la température de transition vitreuse, le verre possède une viscosité supérieure à  $10^{19}$  Pa. s. Il peut être considéré comme un solide. Sous l'effet d'une contrainte de tension B croissante, la déformation varie proportionnellement à la contrainte, et cela jusqu'à la rupture. La rupture survient brutalement sans qu'elle puisse être détectée préalablement. On dit que le verre est un matériau fragile. Il ne présente aucune plasticité macroscopique. En fait, l'expérience de tension ne peut être correctement effectuée que pour les fibres de faible diamètre. Dans la plupart des cas, le module d'Young E, est obtenu par des essais de flexion trois points ou quatre points en statique. En dynamique, on utilise la mise en résonance de barreaux ou la propagation d'ondes longitudinales et transversales générées par des matériaux piézoélectriques

Dans l'expérience précédente, le comportement du verre est celui d'un solide de Hook

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{I.6})$$

Où :

$\varepsilon$ : est la déformation.

Le verre étant isotrope, le couple de modules E et G (module de cisaillement) est suffisant pour calculer le coefficient de Poisson  $\nu$ :

$$E = 2G (1 + \nu) \quad (\text{I.7})$$

Le verre montre un comportement élastique quasiment parfait jusqu'à des températures proches de la transition vitreuse. Cependant, certains verres, contenant des ions extrêmement mobiles (ions alcalins), peuvent présenter une faible élasticité différée (anélasticité) associée à la diffusion sous contrainte de ces ions. Cette élasticité différée est le plus souvent analysée en soumettant le verre à une contrainte sinusoïdale (pendule de torsion, résonance de barreau, propagation d'ondes ultrasonores). Le déphasage entre la contrainte et la déformation, est aussi appelé frottement interne.

## VII.3 Propriétés thermiques

La fabrication du verre est un processus mettant en jeu des températures très élevées, si bien que les propriétés thermiques jouent un rôle important. En outre la connaissance de la chaleur massique est particulièrement importante pour l'étude de la nature du verre.

### VII. 3.a Chaleur spécifique

La chaleur spécifique représente la quantité de chaleur absorbée par une unité de masse du verre quand il s'échauffe d'un degré.

Pour réchauffer un produit de masse  $m$  d'une température  $T_1$  à une température  $T_2$ , il faut dépenser une quantité de chaleur  $Q$  tel que.

$$Q = c_p m (t_1 - t_2) \quad (I.8)$$

Où :

$Q$  : Quantité de chaleur en joule

$c_p$ : Chaleur spécifique massique à pression constante (j /kg. °C)

$m$  : Masse en Kg

$\Delta T$  : variation de la température en °C

Pour les verres silicatés  $C_p$  est comprise entre 0.3 et 1.05 kJ /kg. °C.

### -Dépendance de la chaleur spécifique

#### - Influence de la température

Quoique la chaleur spécifique est considérée comme étant la variation de l'enthalpie par rapport au temps.

$$c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial t} \right)_p \quad (I.9)$$

Et quoique celle-ci soit fonction de la température représentée par la formule suivante :

$$c_p = c_v + [(\beta \cdot T)/(\rho \cdot x)] \quad (I.10)$$

$\beta$ : coefficient de dilatation cubique

$\rho$  : masse volumique

$x$  : compressibilité

$T$  : température

## CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES VERRES

---

L'influence de celle-ci sur la chaleur spécifique d'un verre industriel reste faible (75.2 % SiO<sub>2</sub>, 1.6 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 8.4 % CaO, 0.6 % K<sub>2</sub>O et 14.2 % Na<sub>2</sub>O), la chaleur spécifique dans les intervalles de température est :

$$20 \text{ à } 100^{\circ}\text{C} \Rightarrow 0.202 \text{ Cal/g degré}$$

$$20 \text{ à } 700^{\circ}\text{C} \Rightarrow 0.265 \text{ Cal/g degré}$$

$$20 \text{ à } 1300^{\circ}\text{C} \Rightarrow 0.294 \text{ Cal/g de}$$

### a) Influence de la composition chimique

Il n'existe pas de dépendance directe entre la chaleur spécifique massique et la composition chimique du verre mais il est cependant possible de déterminer la chaleur spécifique par un calcul à partir des constituants mais cette théorie n'est valable que pour un intervalle de température donné (20 à 100 °C). Pour ça on peut utiliser la formule suivante :

$$c_p = \sum c_{p_i} \cdot P_i \quad (\text{I.11})$$

$c_{p_i}$ : Chaleur spécifique moyenne de chaque constituant

$P_i$  : Pourcentage en poids de chaque constituant

L'augmentation de la teneur en oxydes modificateurs entraîne une augmentation de la chaleur spécifique massique contrairement au PbO qui diminue sensiblement la chaleur spécifique.

### VII. 3.b -Conductibilité thermique

C'est le pouvoir ou la capacité d'un matériau de transmettre à travers son épaisseur un flux thermique résultant d'une différence entre la température qui régit entre les surfaces d'un échantillon. Ceci peut être justifié par la formule suivante :

$$Q = \lambda F(t_2 - t_1) \cdot \tau / e \quad (\text{I.12})$$

$\lambda$ : Coefficient de conductibilité thermique en j/m.sec.°C

$\tau$ : Temps en sec.

$e$  : épaisseur en m.

$F$ : surface en m<sup>2</sup>

Généralement le coefficient de conductibilité thermique des verres silicates est compris entre 0.85 à 1.34 j/m.°c.S.

## CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES VERRES

---

Le transfert de chaleur dans les verres peut avoir lieu par conduction et par rayonnement. La conduction s'effectue généralement à des températures moyennes. Le rayonnement s'effectue à haute température.

Donc on définit la conductibilité thermique par conduction  $J_c$  par la relation suivante :

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot c \cdot S \frac{dt}{dx} \quad (I.13)$$

S : surface par laquelle s'écoule la quantité de chaleur dQ perpendiculairement.

dt : le temps pendant lequel s'écoule dQ.

dt/dx : le gradient de la température

La conductibilité par rayonnement  $J_r$  est régit par la formule suivante :

$$\lambda_r = \frac{(16\sigma \cdot n^2 \cdot T^3)}{3K} \quad (I.14)$$

$\sigma$  : Constante de Stéphan-boltzmann

n: Indice de réfraction

T : température

K : coefficient d'absorption

La conductibilité thermique est inversement proportionnelle à l'augmentation des oxydes modificateurs, ainsi l'introduction des alcalins entraîne un abaissement de  $J_c$ , beaucoup plus importante pour  $K_2O$  que  $Na_2O$ .

### VII. 3.c -Dilatation thermique

La dilatation thermique est une propriété aussi importante que la viscosité et d'une importance majeure qui se produit surtout lors du refroidissement de la fonte, chaque particule de la matière oscille par suite de l'énergie thermique, lorsque la température augmente, l'énergie thermique augmente et il en résulte un accroissement de l'amplitude de vibration des particules. Ainsi deux atomes liés l'un à l'autre par des forces (non- harmonique) voient leur distance augmentée à cause de ce processus et cela signifie que lorsque la température s'élève il se produit une dilatation.

On caractérise la dilatation thermique par :

- Le coefficient de dilatation linéaire L (coefficient moyen d'augmentation de la longueur)
- Le coefficient de dilatation cubique I (coefficient moyen d'augmentation de volume).

## CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES VERRES

Le coefficient de dilatation linéaire augmente avec l'augmentation de la température. Le passage du verre de l'état figé à l'état fondu avec l'augmentation de la dilatation correspond à ce dernier état constitue le principe de la détermination de la température de transformation.

Le verre de silice à une structure désordonnée par la suite des liaisons Si-O fortes les possibilités d'oscillations des atomes qui le constitue est limité.

Le coefficient de dilatation est par conséquent très petit pour le verre de silice.

Par l'introduction d'oxydes alcalins binaires cela ne change pas beaucoup de possibilités d'oscillation des tétraèdres [SiO<sub>4</sub>].

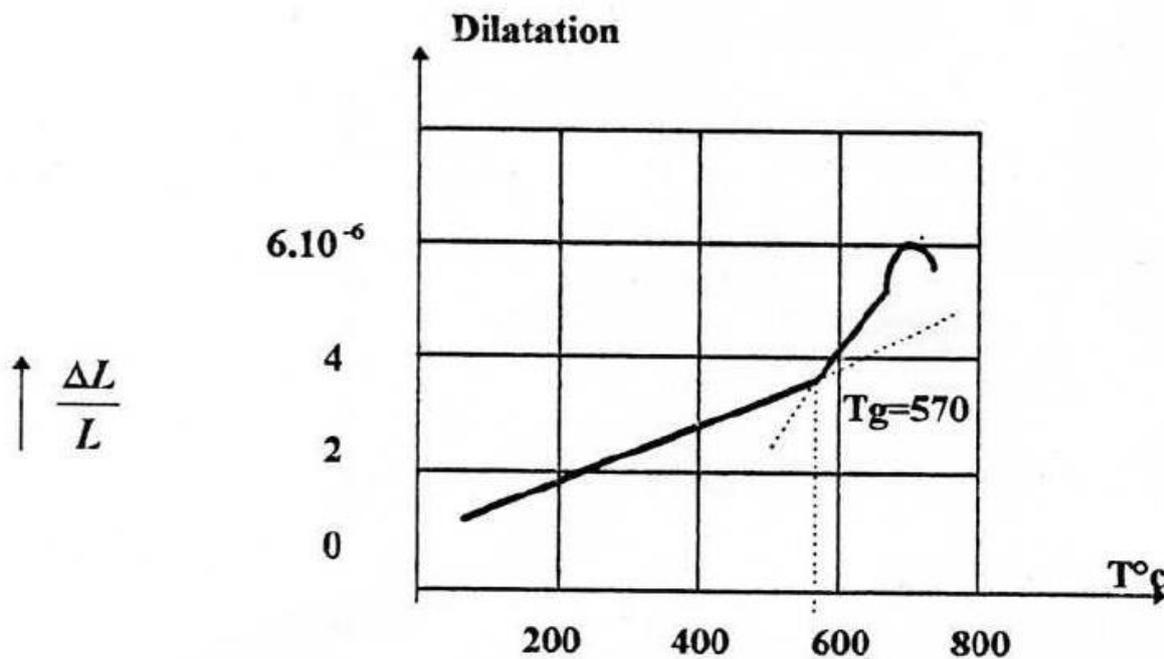


Figure I.5: La courbe de dilatation thermique en fonction de la température

### VII. 4 Propriétés optiques du verre

#### VII. 4.a Réfraction

Si un rayon lumineux passe de l'air où sa vitesse est très voisine de la vitesse maximum  $C_0$ , dans le verre, sa vitesse de propagation se trouve alors réduite suite des interactions qui s'effectuent entre les rayonnements lumineux et les ions qui composent le verre. Ce phénomène peut être décrit par la loi de réfraction :

$$n = \frac{C_0}{C} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (I.15)$$

Où :

$n$  : L'indice de réfraction.

$\alpha$  Et  $\beta$  : angle de rayon lumineux avec la normale respectivement dans l'air et dans le verre.

L'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde  $\lambda$ . Cette dépendance est appelée dispersion.

$$D = \frac{dn}{d\lambda} \quad (I.16)$$

La dispersion est caractérisée par le nombre d'abbé  $v$

$$v = \frac{n_D - 1}{(n_f - n_c)} \quad (I.17)$$

Où :

$n_f$  : Indice de réfraction pour  $\lambda = 486.1 \text{ nm}$  (raie bleue de H)

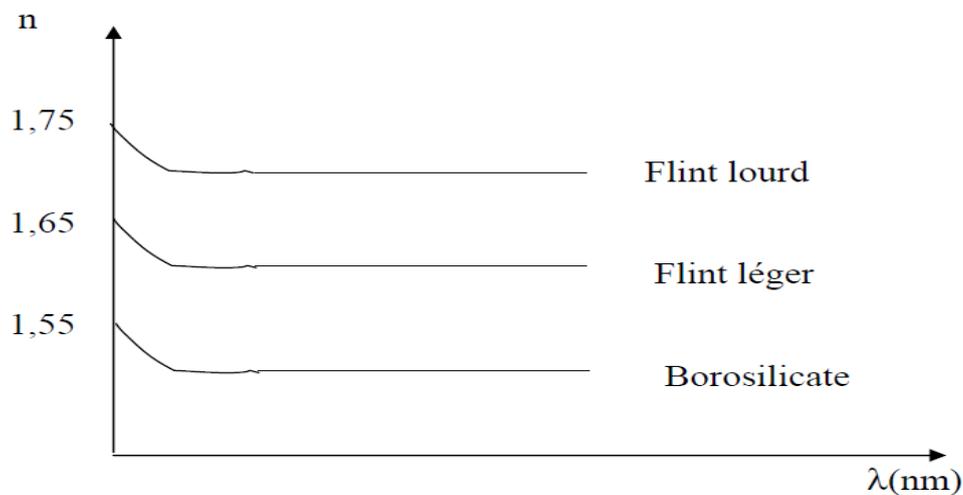
$n_c$  : Indice de réfraction pour  $\lambda = 656.08 \text{ nm}$

$n_{D-1}$ : Dispersion partielle

$(n_f - n_c)$ : Dispersion principale

Les verres avec  $n$  faible et  $v > 55$  s'appellent les verres CROWNS

$n$  élevé et  $v < 50$  s'appellent les verres FLINTS



**Figure I.6:** Indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde

## Influence de la composition

Dans le verre de silice il n'y a que des oxygènes pontant, possèdent une polarisabilité faible. De ce fait, Le verre de silice a un indice de réfraction relativement faible avec  $n_D = 1.4589$ . Dans les silicates alcalins binaires, il existe des oxygènes non pontant qui ont une polarisabilité plus grande, ce qui a pour conséquence une élévation de l'indice de réfraction.

## Influence de la température

On peut déduire de l'équation ci-après que l'indice de réfraction dépend de la masse volumique

$$\frac{dn}{dT} = \frac{\delta n}{\delta T} + \frac{\delta n}{\delta \rho} \frac{d\rho}{dT} = \frac{\partial n}{\partial T} - \beta \rho \frac{\delta n}{\delta T} \quad (I.18)$$

Où  $\beta$  est le coefficient de dilatation cubique et  $\frac{\delta n}{\delta T}$  représente l'influence de la température sur l'indice de réfraction à masse volumique constante, ce facteur dépend de la polarisabilité.

Si la température croît, l'influence des cations sur les ions  $O^{2-}$  devient plus faible, la polarisabilité augmente faiblement, et le coefficient  $\frac{\delta n}{\delta T}$  est également positif.

$\frac{\delta n}{\delta T}$  Peut aussi bien prendre une valeur négative qu'une valeur positive, c'est-à-dire que  $n$  peut croître lorsque la température augmente.

## VII.4.b Transmission optique

L'utilisation courante des verres d'oxydes est liée à leur bonne transmission dans la partie optique (U.V + visible+ infrarouge) du spectre. Cette fenêtre optique qui correspond à la sensibilité spectrale de l'œil humain, est due à ce que les transitions électroniques de la bande de valence vers la bande de conduction correspondent à la coupure dans l'ultraviolet alors que les vibrations propres des ions constituant du réseau produisent leurs effets dans l'infrarouge. L'absorption dans le visible résulte de la superposition des (queues) des transitions électroniques et vibrationnelles auxquelles il faut ajouter les contributions dues à l'impureté telle que les ions des éléments de transition et les centres de couleur. Cette propriété est caractérisée pour trois facteurs :

### -Facteur de transmission T

C'est le rapport du flux lumineux émergent  $F_e$  au flux incident  $F_0$  :

$$T = \frac{F_e}{F_0} \quad (I.19)$$

Pour un produit donné, ce facteur de transmission varie avec la longueur d'onde  $J$  de la lumière incidente.

### -Facteur d'absorption $A$

C'est le rapport du flux lumineux absorbé  $F_a$  au flux incident  $F_i$  :

$$A = \frac{F_a}{F_i} \quad (I.20)$$

- Dans le spectre visible ( $J=0.4$  à  $0.8\mu\text{m}$ ) le facteur d'absorption de la plus part des verres utilisée en vitrage a sensiblement la même valeur, de l'ordre de 2% dans toute l'étendue du spectre ce chiffre est valable pour des produits de faible épaisseur.
- Dans le spectre ultraviolet ( $J<0.4 \mu\text{m}$ ). Jusqu'à  $0.36 \mu\text{m}$ , l'absorption par les verres ordinaires demeure du même ordre de grandeur que le spectre visible.
- Dans le spectre infrarouge ( $J>0.8 \mu\text{m}$ ). L'absorption est faible jusqu'à  $2 \mu\text{m}$ , puis augmente très fortement, pour être pratiquement totale au de la de  $5 \mu\text{m}$ .

### -Facteur de réflexion

La réflexion est une propriété optique aussi intéressante elle se passe toujours sur la frontière entre le corps dense et l'air. Donc la réflexion c'est le rapport de flux lumineux  $F_r$  au flux incident  $F_i$

$$A = \frac{F_0}{F_i} \quad (I.21)$$

## VII.5 Propriétés électriques

Un corps est électriquement conducteur si les électrons ou les ions libres à l'intérieur de ce corps permettent le transport de courant. Cette propriété est caractérisée par la conductivité électrique volumique  $N$  qui représente la conductance d'un corps cylindrique de section  $1 \text{ cm}^2$  et de longueur  $1 \text{ cm}$ . La valeur inverse de  $N$  est la résistivité électrique volumique  $F$ . L'unité de  $F$  est  $\Omega \cdot \text{cm}$  celle de  $N$  est  $\text{s/cm}$ .

Au point de vue de leurs structures, les verres sont formés d'un réseau dans lequel s'insèrent les cations modificateurs. Puisque ceux-ci avant tout les ions alcalins, sont liés dans le réseau surtout de façon ionique, ils ont une certaine mobilité, si bien que les verres possèdent une faible conductivité électrique. Il avait été constaté depuis longtemps que la loi de Faraday était ainsi observée.

### -Dépendance de la composition

La conductivité dépend d'une manière complexe de la composition.

Les études les plus récentes sur un verre  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 3 \text{ SiO}_2$  à  $300^\circ \text{C}$  par ENGEL et TOMAZAWA ont donné pour  $f$  une valeur de 0.5 et ainsi ils ont montré que la diffusion de Na dans ces

conditions était indépendante des champs électriques. Si un verre ne contient pas de modificateur de réseau, il doit posséder une conductivité très faible.

Pour le verre de  $B_2O_3$  pur, on devrait s'attendre aussi à une résistivité très élevée. En passant au verre de silicates alcalin on constate alors que deux facteurs agissent sur la conductivité, la force de liaison des ions dans le réseau et leurs dimensions.

L'introduction de l'ion  $K^+$  est plus faiblement lié, mais à cause de son rayon plus il oppose une résistance plus à la migration, tandis que pour l'ion  $Li^+$  c'est le contraire.

Généralement  $F$  augmente faiblement dans l'ordre de  $Li - Na - K - CaO$  consolide la structure et conduit de ce fait à une forte augmentation de la résistivité.

### **-Influence de la température**

L'interprétation de la formule qui suit conduit à la mise en évidence de l'influence de la température sur la conductivité électrique.

$$\ln x = A - \frac{E_x}{RT} \quad (I.22)$$

$E_x$  : l'énergie d'activation de la conductivité électrique.

$A$  : Une grandeur en fonction de la température.

$$A = c^{te} \cdot \ln \frac{1}{T} \quad (I.23)$$

L'idée que les mobilités et par conséquent la conductivité électrique ainsi l'influence de la température est principalement déterminée par l'énergie d'activation, pour les verres habituels elle est de l'ordre de 80kj/mole. Cette énergie est déterminée par le franchissement de la barrière de potentiel.

### **VII.6 Propriétés chimiques**

La durabilité chimique est l'expression de la résistance du matériau à un environnement. Pour un verre, elle exprime sa résistance à la dégradation dans les solutions aqueuses. Cette grandeur est généralement rapportée à l'unité de surface de matière par unité de temps.

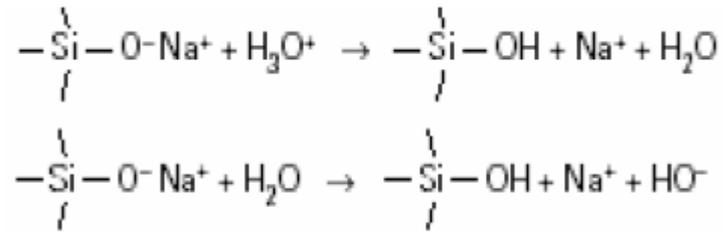
Les tests de corrosion sont adaptés à la fonction du verre, mais, en général, on exprime la perte en masse par unité de temps de l'échantillon dont le volume est bien inférieur à celui de la solution corrosive.

Dans les verres de silicates classiques contenant des oxydes alcalins, l'ion alcalin est très mobile. La surface d'un verre, laissé au contact de l'air, s'enrichit progressivement en alcalin qui réagit avec le  $CO_2$  ambiant pour donner un carbonate soluble.

## CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES VERRES

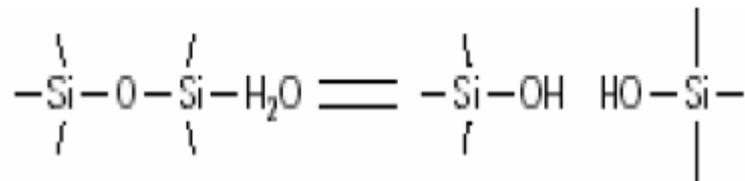
---

Au contact d'une solution aqueuse de pH neutre, le sodium est échangé par les protons de la solution suivant le schéma réactionnel



Une solution acide favorise cet échange ; une solution basique, à base de sel de sodium, limite cette réaction. La conséquence directe d'une corrosion menée sans renouvellement d'eau est que le pH d'une eau pure augmente progressivement en raison de la libération des alcalins du verre. L'échange ionique est cependant moindre si l'ion alcalin joue le rôle de compensateur de charge au voisinage de groupes  $(\text{AlO}_4)^-$  ou  $(\text{BO}_4)^-$ .

Le deuxième type de mécanisme impliqué dans la corrosion est l'hydrolyse du réseau selon la réaction.



Cette réaction, favorisée en milieu basique ( $\text{OH}^-$ ) est une attaque nucléophile nécessitant un réarrangement atomique. Les atomes de silicium liés à des oxygènes non pontants sont plus mobiles et facilitent cette réaction. La RMN (résonance magnétique nucléaire) à angle magique du silicium donne la distribution des divers types de silicium. La réaction est favorisée au niveau des entités structurales sous contrainte (cycles à 3 ou 4 atomes de silicium) ou en présence d'une contrainte externe. Notons que la réaction inverse de polycondensation ou de restructuration peut également se produire si la localisation des deux groupes dans le réseau le permet. Ce phénomène entraîne une restructuration des couches altérées. Dans des solutions très basiques ( $\text{pH} > 10$ ), l'hydrolyse du réseau est totale et conduit à la dissolution du verre. Les verres résistant aux solutions basiques (par exemple, au contact du ciment) sont des verres contenant une quantité appréciable de zircone,  $\text{ZrO}_2$ . Préalablement à ces deux réactions essentielles qui sont la cause de la corrosion, l'eau doit diffuser au travers du réseau vitreux. Cette diffusion dépend de la constitution du réseau.

La molécule d'eau de diamètre égal à 0,28 nm, diffuse librement si le verre est constitué par des anneaux de grande taille ( $n > 6$ , où  $n$  : est le nombre de silicium). Au contraire, l'hydrolyse d'une liaison  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$  est nécessaire pour  $n < 6$ . Il y a donc limitation à la diffusion de l'eau moléculaire. Cependant, si le nombre de tétraèdres formant le cycle est faible  $n = 3, 4, \dots$  l'hydrolyse est facilitée en raison de la contrainte interne associée aux angles de liaisons des

cycles. Dans quelques verres, il a été noté une expansion du réseau causée par la diffusion de l'eau moléculaire.

La corrosion des verres est un phénomène complexe qui peut prendre des formes variées suivant :

- la nature et la composition du verre
- le pH et la nature des sels dissous dans la solution de corrosion
- le renouvellement éventuel de la solution
- la température l'état de contrainte du verre.

### **VIII. Fabrication des verres (verre plat, verre creux)**

Les différents procédés de mise en forme permettent de classer les produits verriers en trois grandes catégories [8-9] :

- Le verre plat (verre à vitre, miroirs...)
- Le verre creux (bouteilles, bocaux, flacons, objets de décoration...)
- Les fibres de verre textiles et non textiles et les autres verres (verre cellulaire, verre optique, verre de télévision, tube et ampoule...).

#### **VIII.1 Procédés de fabrication du verre plat**

La fabrication des feuilles en verre (verre plat) ; les verres à vitre, la glace, les verres coulés peut être effectuée à l'aide de différents procédés, parmi lesquels on citera [9] :

- Etirage mécanique vertical avec débiteuse (Procédé FOURCAULT)
- Etirage mécanique sans débiteuse avec une pièce en réfractaire appelée (Draw-Bar)
- immergé dans le verre fondu (Procédé PITTSBURG).
- Etirage mécanique horizontal (Procédé LIBBEY- OWENS)
- Procédé de laminage
- Float – Glass (procédé PILKINGTON)

#### **VIII.1.A -Procédé de flottage (FLOAT GLASS)**

Le procédé de Float constitue un pas technologique très important dans la fabrication du verre plat, ce procédé, qui se démarque radicalement de ces prédécesseurs, a été inventé par ALSTAIR PILKINGTON en 1952. Il s'agit en effet d'un procédé complet qui rassemble les différentes étapes de la production en une seule et même unité de production d'une longueur

moyenne de 400 m. Généralisé dans les années 60 ; le procédé a été adopté depuis comme méthode standard pour la fabrication du verre plat de haute qualité.

Cette technique consiste à faire flotter le ruban de verre sur un bain d'étain liquide. Il n'a plus besoin de polissage ou de doucissage et peut donc être directement découpé.

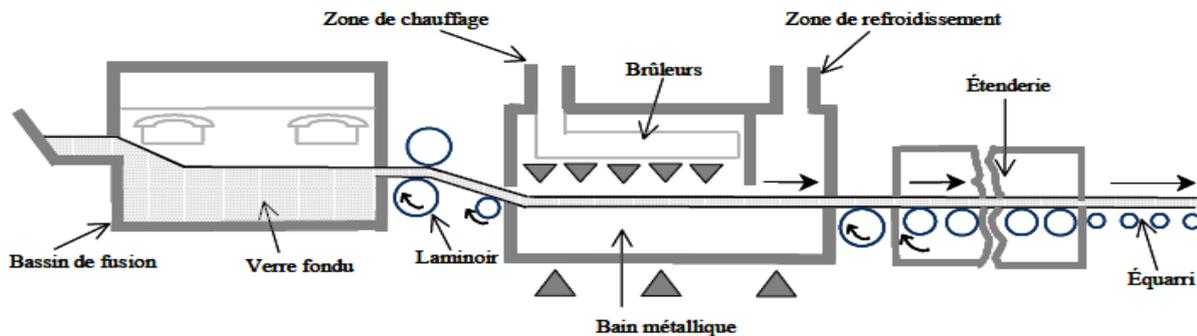


Figure I.7: Schéma du procédé float.

Le procédé est composé de plusieurs phases :

### Phase1 : L'enfournement

Les matières premières sont pesées puis mélangées et humidifiées. Elles composent alors de charge vitrifiable on ajoute du calcin, le tout est envoyé jusqu'au four.

### Phase2 : Le four

La transformation des matières premières en verre s'effectue dans un four à bassin en matériau réfractaire, par chauffage à 1550°C. Dans le cas de procédé (Float) le four contient 2000 tonnes de verre en fusion, soit la production de 2 à 3 jours.

### Phase3 : Le bain d'étain

À sa sortie du four le verre fondu est dirigé dans un canal d'où il coule sur un bain d'étain en fusion. Ce lac d'étain liquide a une température d'environ 1050°C et fournit une surface parfaitement plane. Du fait de sa densité très inférieure à celle de métal, le verre flotte sur l'étain liquide, il s'étale alors en un long ruban continu. C'est l'équilibre des forces de gravité et de tension superficielle qui produit une feuille de verre aux faces bien parallèles et d'une épaisseur uniforme voisine de 6.5mm, quel que soit la largeur de la bande.

Pour faire varier l'épaisseur, des roues dentées sont placées en aval sur les bords du ruban, à un endroit où il est suffisamment refroidi. Elles étirent ou repoussent le verre latéralement pour obtenir l'épaisseur désirée.

### **Phase4** : L'étenderie

A sa sortie du bain d'étain la feuille de verre est à une température d'environ 600°C.

Sa plasticité est donc encore assez faible, mais suffisante néanmoins pour être soulevée, légèrement afin d'être placé sur un convoyeur à rouleaux. Celui-ci va entraîner la plaque de verre vers un tunnel de refroidissement appelée (Étenderie) dans ce tunnel de longueur de 100 m, le ruban de verre se refroidit de façon régulière et sous contrôle constant. Il acquiert vers 500°C les propriétés d'un solide parfaitement élastique. Et c'est à cette température qu'est effectuée la recuisons qui permet de stabiliser ces propriétés.

### **Phase5** :L'équarri

La plaque de verre quitte l'étenderie à 200°C et continue de se refroidir à l'air libre mais il est déjà suffisamment froide pour être manipuler.

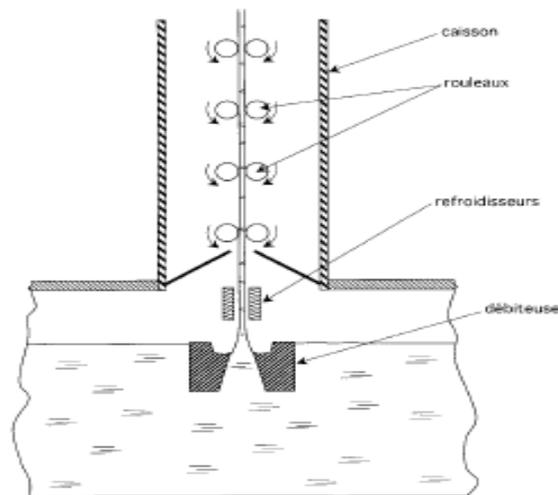
Le Float est utilisé dans la fabrication de :

- Verre feuilleté
- Verre trempé
- Verre isolant
- Miroir
- Verre réfléchissant
- Verre à couche
- Verre à protection de radiation.

### **VIII.1.B Le procédé Fourcault**

L'étirage d'un ruban de verre par immersion et extraction d'un peigne métallique vertical est simple dans son principe mais présente l'inconvénient [8] que sous l'action de la tension superficielle le ruban vertical a tendance à se rétrécir et de plus son « pied » n'est pas suffisamment stable. Le procédé Fourcault qui fut exploité à partir de 1913 résolvait ces deux problèmes par l'emploi de la débiteuse et de refroidisseurs (Figure).

La débiteuse est une pièce de réfractaire de 3 m de longueur qui a la forme d'une auge dont le fond comporte une fente longitudinale. Des tiges métalliques verticales permettent de régler l'enfoncement de cette pièce dans le bain. Sous l'action de la pression hydrostatique, le verre jaillit par la fente de la débiteuse, ce qui définit la position du pied de feuille.



**Figure I.8:** Schéma de fonctionnement du procédé Fourcault.

Les refroidisseurs sont des boîtes métalliques où circule de l'eau et qui sont situées au-dessus de la lèvre de la débiteuse. Ils recueillent le rayonnement émis par les surfaces de la feuille ce qui les refroidit fortement.

Ces surfaces sont ainsi figées, ce qui empêche la striction. Au-dessus des refroidisseurs, des rouleaux métalliques entraînent verticalement la feuille dans un puits d'étirage d'une hauteur de 7 m environ. Dans la partie supérieure du puits la feuille est découpée en plateaux.

Les largeurs de la feuille sont comprises entre 2 m et 2,5 m et les épaisseurs entre 0,5 et 10 mm. La vitesse d'étirage en 2 mm est d'environ 90 m/h.

### VIII.1.C Le procédé Pittsburgh

Les feuilles de verre produites par le procédé Fourcault présentaient parfois des défauts de surface dus au contact de la débiteuse. Le procédé développé à partir de 1925 par la société PPG évite cet inconvénient en utilisant, pour stabiliser la feuille, à la place de la débiteuse, une « barre d'étirage » (draw bar), pièce rectangulaire en réfractaire possédant une nervure longitudinale et immergée sous environ 10 cm de verre (Figure). Des améliorations successives ont permis de produire par ce procédé du verre de bonne qualité pour le vitrage, en largeur de 4 m. La vitesse d'étirage en 2 mm était de 150 m/h.

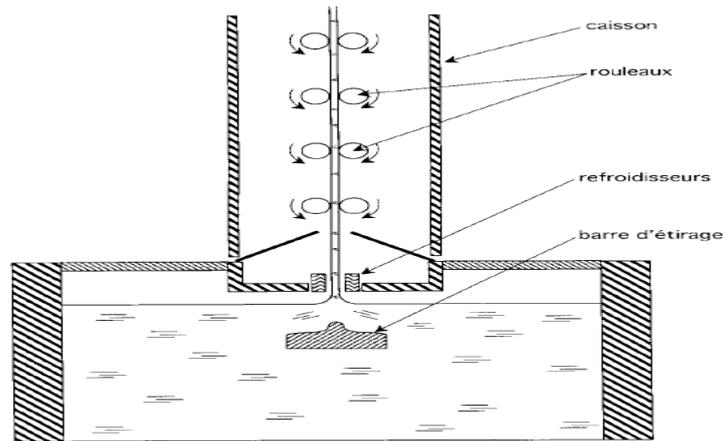


Figure I.9 : Schéma de fonctionnement du procédé Pittsburgh.

## VIII.1.D Le procédé Colburn (Libbey –Owens)

Exploité par la société Libbey-Owens à partir de 1916, le procédé Colburn, du nom de son inventeur, a deux particularités. Il n'utilise pas de pièces en réfractaire mais deux paires de mollettes motorisées situées au-dessus du bain et qui maintiennent les bords de la feuille. En outre, un rouleau « plieur » amène le ruban en position horizontale ce qui facilite la recuison et la découpe. En revanche, la surface du verre risque d'être endommagée par le contact du rouleau (Figure)

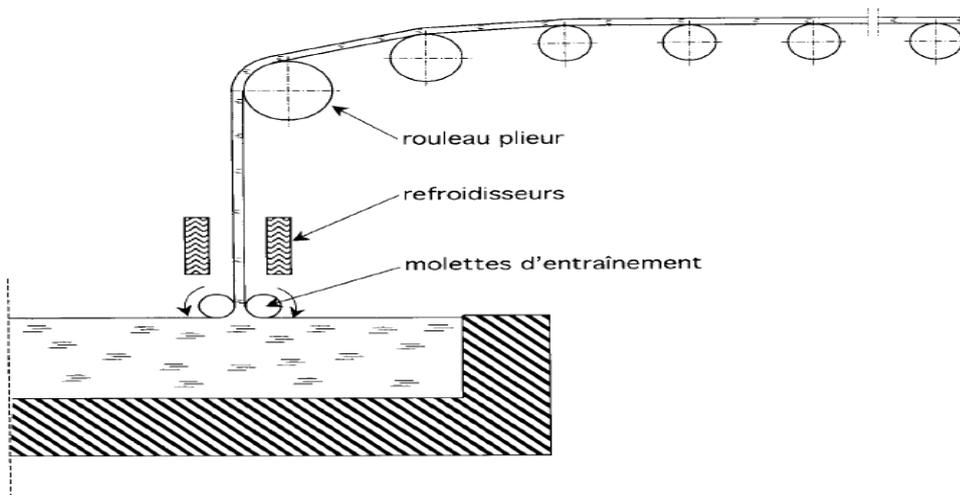


Figure I.10 : Schéma de fonctionnement du procédé Libbey-Owens

### VIII.1.E L'étirage vers le bas

En 1964 la société Corning prit un brevet pour produire du verre plat par étirage vers le bas. Dans ce procédé, une auge en réfractaire reçoit par l'un de ses petits côtés du verre fondu sous pression. Le verre remplit toute l'auge et déborde le long des flancs. Comme la largeur du fond de l'auge se rétrécit vers le bas en forme de queue de poisson, les deux flux de verre qui coulent le long des flancs se rejoignent pour se fondre l'un dans l'autre, d'où le nom « fusion draw » qui a été donné au procédé. Le ruban résultant est étiré vers le bas (Figure). Prévu au départ pour les vitrages automobile, ce procédé dut attendre, pour être utilisé, le développement des écrans d'affichage pour les ordinateurs car il permet d'obtenir du verre mince de bonne qualité.

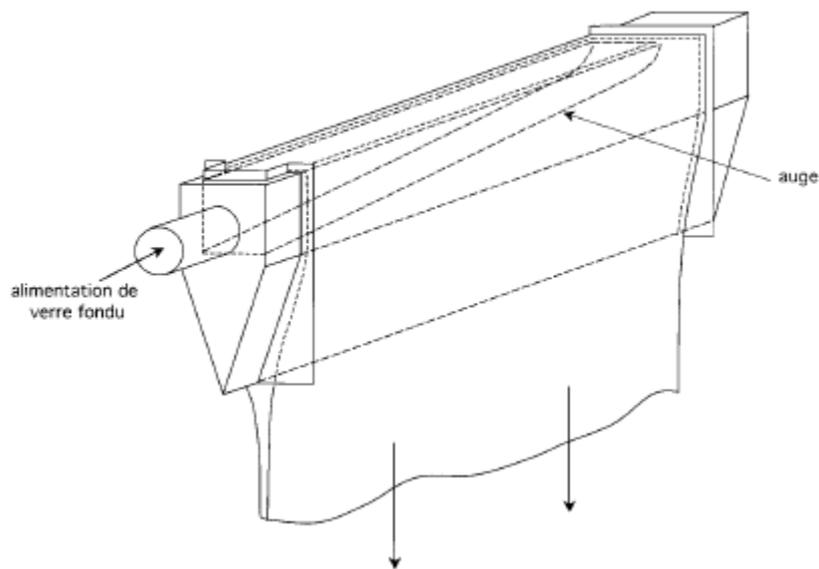


Figure I.11 : Schéma du procédé d'étirage vers le bas de Corning.

### VIII.2 Procédés de fabrication du verre creux :

A la sortie du four, un mécanisme de cisaillement permet au verre d'être distribué sous la forme de gouttes (ou paraisons). Un mélange d'eau et d'huile soluble est vaporisé sur le système de coupe pour éviter qu'il ne surchauffe et pour éviter que le verre reste collé à lui. La mise en forme se fait suivant le procédé soufflé-soufflé ou pressé-soufflé [9].

La fabrication du verre creux, évoque le travail du souffleur de verre qui, au cours de nombreuses décennies, a effectivement su trouver et optimiser les étapes essentielles du formage d'une pièce. Ces étapes comportent le cueillage d'une goutte de verre, la formation par soufflage d'une préforme, et son gonflage dans un moule à la forme de l'article désiré. Les évolutions réalisées depuis, ont en définitive consisté surtout à mécaniser ces pratiques manuelles de façon à augmenter la reproductibilité et la productivité horaire des fabrications.

## CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES VERRES

Progressivement, les procédés de fabrication se sont développés et spécialisés en fonction des types de produits à élaborer; on distingue en effet dans l'industrie du verre creux plusieurs segments de marché comme:

- les bouteilles pour l'emballage des boissons alimentaires et les flacons pour la parfumerie, se caractérisant tous les deux par une bague étroite, utilisant majoritairement un procédé appelé *Soufflé-Soufflé*
- les pots pour les produits alimentaires secs et pâteux et ceux de grande capacité pour les jus de fruits, avec une bague plutôt large, autorisant un procédé appelé *Pressé-Soufflé*
- les articles de table, verres, gobelets, assiettes, saladiers... donc sans bague et élaborés par une technologie de *pressage* dans un moule, ou par une technologie plus récente de *centrifugation* grâce à la rotation rapide du moule: cette dernière technologie ne peut évidemment envisager que pour des articles ayant une symétrie de révolution
- les verres à pieds et autres (certains gobelets), demandant une surface sans défauts et sans marques de joints de moule, et utilisant une technologie associant pressage pour l'ébauche et rotation de l'ébauche pendant le soufflage dans le moule finisseur: procédé appelé *Pressé-Soufflé-Tourné*
- les produits d'ornementation de très haute qualité, souvent en cristal, et utilisant encore des procédés manuels ou semi automatiques.

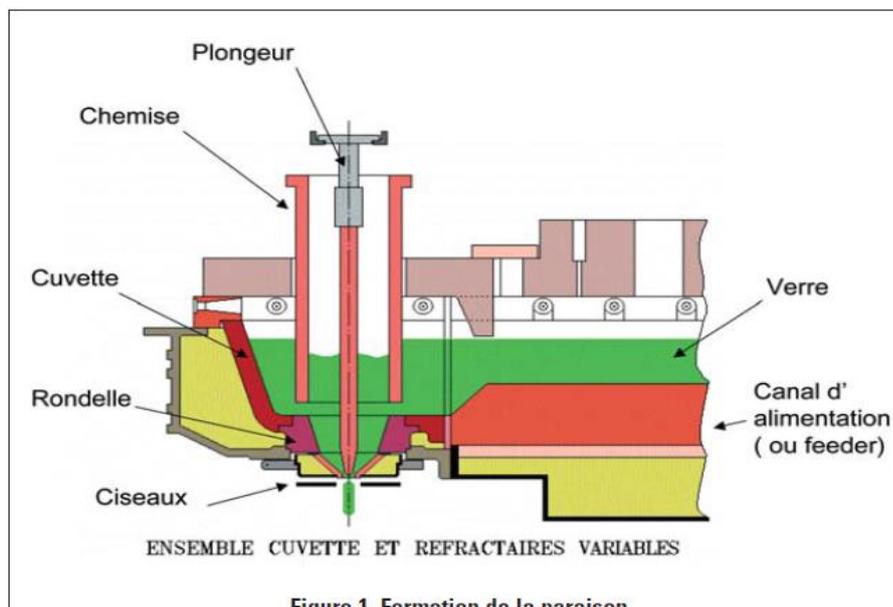


Figure 1. Formation de la paraison

Figure I.12 : Formation de la paraison (verre creux)

### VIII.2.a Formation de la paraison :

La première étape de la fabrication consiste à élaborer une goutte de verre appelée *paraison* ayant un poids bien précis (celui de l'article final) et une température bien fixée (d'environ 1150°C), à une cadence synchrone de celle de la machine porteuse des moules. Ce résultat est obtenu grâce un système assez complexe représenté par le schéma de la figure1 qui comporte:

- un canal de distribution connecté au four délivrant un filet de verre homogène chimiquement et thermiquement, qui est régulé au degré près
- un mécanisme de coupe du filet fait d'un véritable ciseau muni de lames en acier réfractaire
- et un système de distribution des gouttes de verre ainsi formées vers les moules de formage.

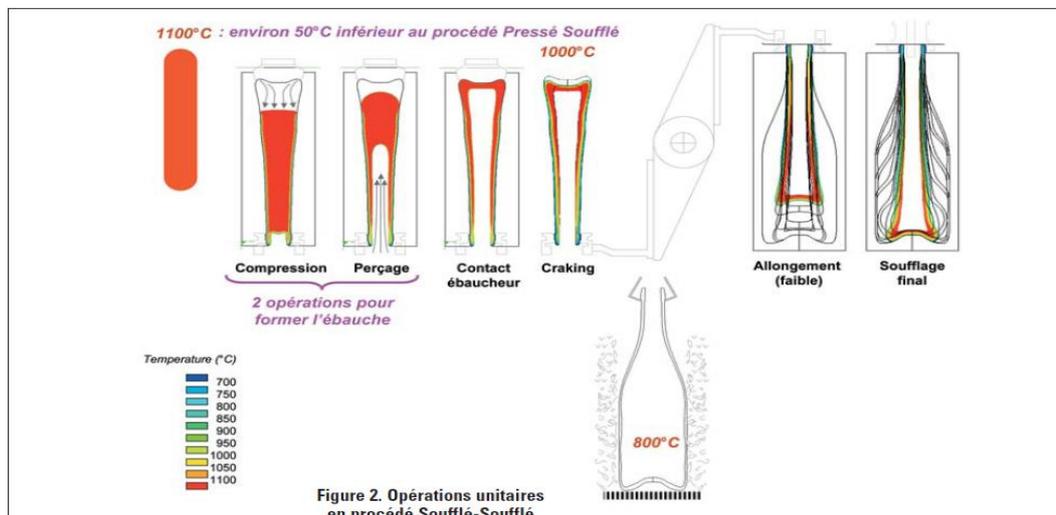
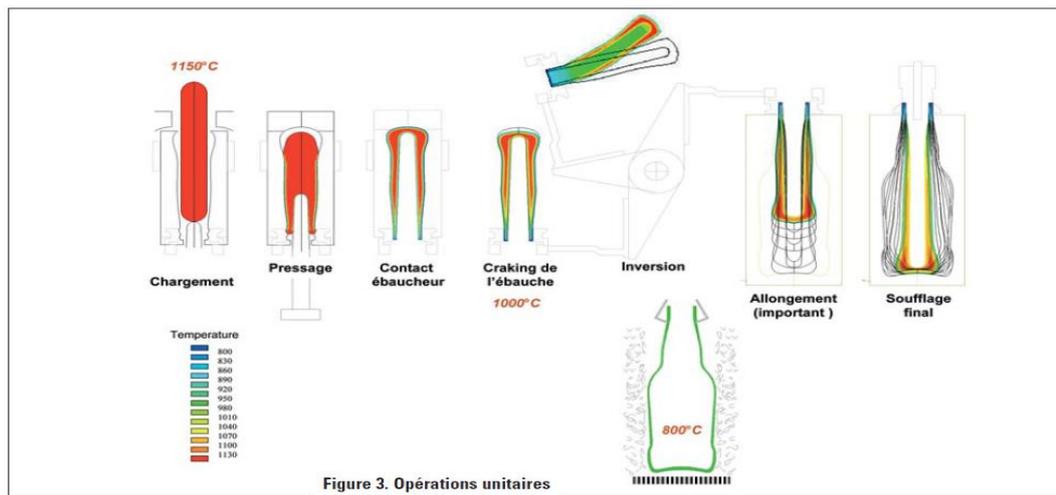
### VIII.2.b Formage de l'article :

Cette goutte de verre, ou paraison, est dirigée vers le moule ébaucheur. Dans le procédé soufflé-soufflé, ce dernier est équipé dans sa partie inférieure d'un poinçon de 2 à 3 cm que le verre recouvre grâce à l'énergie cinétique qu'il a acquise pendant sa chute libre (ou guidée) depuis la coupe jusqu'à l'entrée du moule. Par la formation d'une empreinte dans le verre se termine la *phase de chargement*. Le moule est ensuite fermé par un fond ébaucheur et de l'air est immédiatement introduit à travers ce fond pour pousser le verre autour du petit poinçon et former ainsi la bague de la future bouteille: c'est la *phase de compression*.

Le poinçon peut alors se retirer légèrement pour permettre un premier soufflage à l'air comprimé de l'empreinte : le verre va alors se déformer et occuper l'espace libre du moule ébaucheur. C'est la *phase de formation de l'ébauche* (perçage). Au contact du moule, refroidi en permanence, l'ébauche se refroidit en surface, à environ 750–800°C, et acquiert une rigidité suffisante pour être, après ouverture du moule ébaucheur, transférée dans le moule finisseur en attente en position ouverte: c'est la *phase de transfert de l'ébauche*. Dans le moule finisseur fermé, l'ébauche s'allonge sous son propre poids et sa surface se réchauffe par un transfert des calories du cœur de l'ébauche vers sa surface : c'est l'opération importante de *réchauffage* qui homogénéise les températures, et donc les viscosités des couches de verre de l'ébauche ; dès que l'ébauche touche le fond du finisseur, l'opération de gonflage se met en action, jusqu'à la mise en contact du verre avec la surface complète du moule finisseur : ce contact est maintenu quelques secondes pour extraire suffisamment de calories et rigidifier définitivement l'article. Le moule finisseur est alors ouvert et l'article est transféré sur un convoyeur qui l'amènera vers les étapes ultérieures de la fabrication, comme la cuisson et l'application de traitements de surface. Cette description est exactement celle du *procédé Soufflé-Soufflé* (figure 2): soufflage dans le moule ébaucheur pour former

## CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES VERRES

l'ébauche et soufflage dans le moule finisseur pour former l'article. Dans le *procédé Pressé-Soufflé*, la formation de l'ébauche dans le moule ébaucheur s'effectue par pressage à l'aide d'un poinçon nettement plus grand que pour le procédé Soufflé-Soufflé, qui est animé d'un mouvement vertical relativement important de bas en haut: comme on peut le comprendre sur le schéma de la figure 3, ce poinçon forme l'ébauche en une seule étape, avec une meilleure maîtrise de l'épaisseur de verre qui est parfaitement définie par l'espace libre entre le moule ébaucheur et le poinçon en position finale haute. Ce procédé convient donc plutôt aux articles légers.



**Figure I.13 : Procédés Presso-soufflé et Soufflé-soufflé**

## CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES VERRES

**Tableau I.3 :** Comparaison entre les deux procédés d'élaboration du verre creux [9]

	<b>Procédé Soufflé-Soufflé</b>	<b>Procédés Pressé-Soufflé</b>
<b>Avantages (+)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- s'adapte à toutes les formes de bouteille</li><li>- peau interne sans défauts : pas de contacts métalliques</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- très bonne définition de la géométrie de l'ébauche</li><li>- donc bon contrôle des épaisseurs de verre</li><li>- donc procédé recommandé pour des articles allégés</li><li>- seul procédé pour les articles à large ouverture</li></ul>
<b>Inconvénients (-)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- répartitions d'épaisseur du verre plus irrégulières et très sensible aux hétérogénéités thermiques du verre</li><li>- donc convient mieux aux articles lourds</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- possibilités de contaminations de la peau interne du verre par le poinçon</li><li>- difficultés avec des articles hauts et étroits demandant des géométries de poinçon difficiles à élaborer</li></ul>

### II. Erosion du verre

#### II. 1 Introduction :

L'érosion est un phénomène qu'on peut observer dans plusieurs domaines d'applications. Il produit des endommagements importants lors du contact des objets avec des particules érodantes présentes dans l'air, un gaz ou dans un flux liquide. Afin de minimiser ou d'éviter les endommagements causés par la dégradation progressive, les processus de l'érosion doivent être étudiés avec un grand soin.

Plusieurs exemples montrent l'importance de l'étude de l'érosion des matériaux par des particules solides, chose qui a poussé un grand nombre de laboratoire à travers le monde à étudier ce problème.

#### II.2 Principe de l'essai d'érosion par des particules solides :

L'essai d'érosion est un procédé d'endommagement qui consiste à projeter des particules solides de forme et de nature diverses sur une cible sous différentes conditions d'essais (angles d'impact, vitesses,...). La figure II.1 montre le principe de l'essai d'érosion par des particules solides projetées sur une cible fixe. Il consiste à projeter des particules solides sur la surface d'une cible et à étudier les endommagements en surface et leurs conséquences sur les propriétés des matériaux.



**Figure II.1 :** Principe de l'essai d'érosion par des particules solides projetées sur une cible Fixe [1].

## CHAPITRE II : LE PHENOMENE D'EROSION

---

Il existe deux techniques pour étudier l'érosion des matériaux par impact de particules solides :

- Soit sous pression, par projection des particules à des vitesses importantes et variables pouvant atteindre 340 m/s;
- Soit par gravitation, par chute libre des particules dont la vitesse d'impact est relativement petite.

RUFF et WIEDERHORN [1] ont montré que l'érosion des matériaux est affectée par plusieurs facteurs comme : les propriétés des particules érodantes (taille, forme, densité, dureté), les propriétés du matériau cible (dureté, état de surface) et les conditions d'essais (vitesse d'impact, angle, température....).

Les études montrent que les matériaux projectiles et cibles peuvent être de natures très variables (verres, céramiques, métaux, polymères,...). Les essais réalisés dépendent des conditions réelles d'utilisation (simulation des vents de sable, impact des particules solides sur les engins volants, impact des particules de grêle sur le vitrage des avions,...). L'état de surface obtenu est généralement très rugueux.

Pour les matériaux ductiles, l'érosion est un procédé qui est utilisé pour prolonger la durée de vie des pièces par la création des contraintes de compression dans les couches superficielles (bâti de machines-outils, durcissement des pièces travaillant en mode dynamique, ...).

### II.3 Mécanisme de l'érosion :

La nature des matériaux joue un rôle très important dans les mécanismes d'érosion :

- \* Si le matériau est ductile, la géométrie de la déformation due à l'impact d'une particule solide dépend de la vitesse d'impact, de la forme de la particule et enfin de l'angle d'impact.
- \* Pour les matériaux fragiles, l'érosion est un procédé qui est utilisé pour la gravure d'objets d'art et parfois au perçage des pièces de faible épaisseur en présence d'un jet de liquide à grande vitesse.

#### II.3.a Matériaux ductiles :

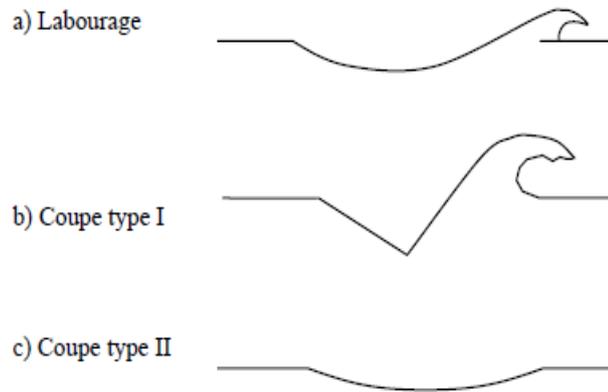
Les études montrent qu'il existe 3 types de mécanismes :

- Les particules arrondies déforment la surface sous un aspect de labourage, « ploughing ». Il se produit un déplacement de matière sur les cotés et au devant de la particule (figure II.2a) :
- Les particules anguleuses provoquent :

## CHAPITRE II : LE PHENOMENE D'EROSION

\* une coupe dite de type I (figure II.2b). Les particules roulent à l'avant en indentant la surface et en poussant la matière sous forme d'une grande saillie. Cette saillie est facilement enlevée par d'autres impacts éventuels.

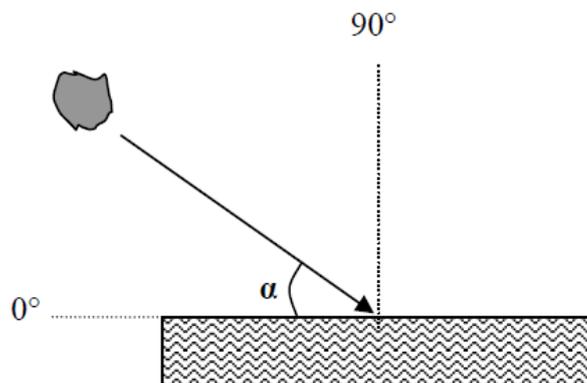
\* une coupe dite de type II (figure II. 2c). Les particules anguleuses roulent à l'arrière en indentant la surface et en enlevant la matière.



**Figure II. 2** : Mécanismes d'érosion pour les matériaux ductiles

Les mécanismes d'usure érosive sont liés aux paramètres qui gouvernent le phénomène de l'érosion : essentiellement l'angle d'impact et la vitesse des particules incidentes.

**a) Angle d'impact  $\alpha$**  : il est défini entre la surface exposée à l'érosion et la trajectoire de la particule juste avant l'impact (figure II.3).

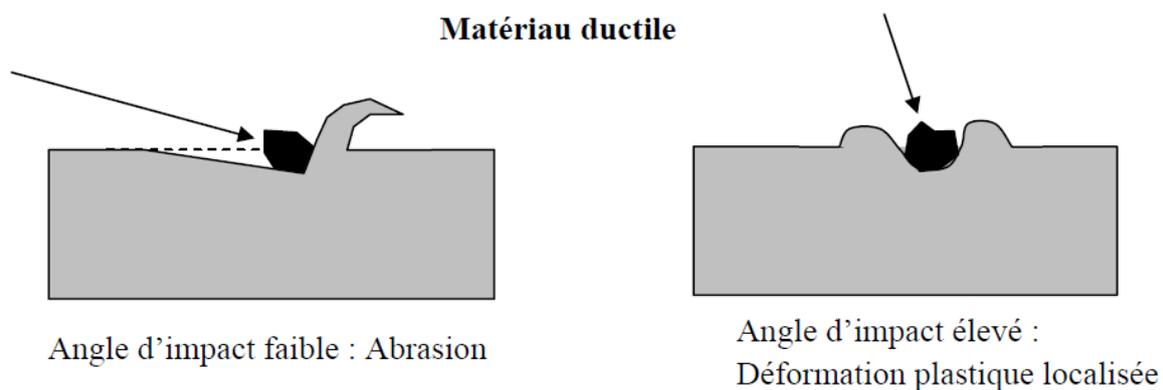


**Figure II. 3** : Définition de l'angle d'impact  $\alpha$  durant le processus d'érosion

Le processus d'usure érosive dépend de l'angle d'impact (figure II.4) :

- Si l'angle d'impact est faible : le processus d'usure devient similaire à l'abrasion, car les particules érodentes tendent à rayer ou à sillonner la surface après les impacts.

- Si l'angle d'impact est grand et tend vers  $90^\circ$ , les particules pénètrent partiellement dans la matière et peuvent y rester : le processus d'érosion se fait par la formation d'un bourrelet autour de l'impact suite à une déformation plastique localisée.



**Figure II.4** : Processus d'usure érosive sous différents angles d'impacts [10].

**b) Vitesse des particules érosives  $V_p$**  : elle présente un effet très important sur le processus d'érosion puisque c'est elle qui gouverne l'énergie cinétique des particules (figure II.5) :

- Si  $V_p$  est très faible, les contraintes à l'impact sont insuffisantes pour produire une déformation plastique localisée, et l'érosion se produit par une fatigue localisée au niveau de la surface. Il se forme un réseau de microfissures qui tend à endommager la surface.

- Si  $V_p$  est moyenne (autour de 20 m/s) : il est possible que le matériau érodé se déforme plastiquement à l'impact. Dans ce cas assez connu des composants mécaniques, l'érosion se produit par déformation plastique répétée.

- Si  $V_p$  est très grande, il se produit une fusion au niveau de la surface d'impact.

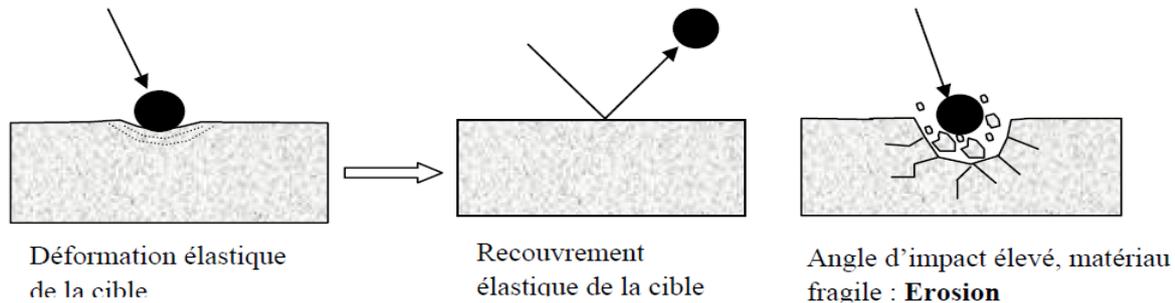
**Figure II.5** : Influence de la vitesse sur les mécanismes d'érosion

### II.3.b Matériaux fragiles :

Si le matériau cible est fragile, le résultat de l'impact dépend essentiellement de l'énergie cinétique  $EC$  des particules (figure II.6) :

**a) Particules arrondies**- Si  $EC$  est faible : il se produit des rebonds purement élastiques. Les particules frappent la surface et rebondissent. Il n'y a pas d'endommagement apparent.

- Si  $E_c$  est assez grande : les particules pénètrent partiellement dans le matériau et créent des cratères.



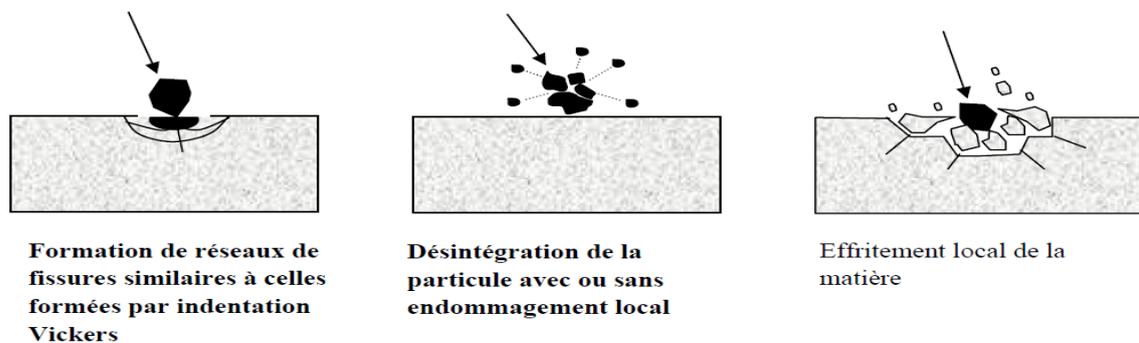
**Figure II. 6** : Influence de l'énergie cinétique des particules arrondies  
Sur le processus d'érosion [10]

### b) Particules anguleuses

- Si  $E_c$  est moyenne : il se forme un réseau de fissures similaire à celui produit par indentation Vickers : des fissures radiales en surface, médianes en profondeur et perpendiculairement à la surface et enfin des fissures latérales qui évoluent presque parallèlement à la surface et qui ont responsables de la formation d'écailles. Il y a endommagement local.

- Si  $E_c$  est assez grande : les particules peuvent former des cratères ou se désintégrer. Il y a endommagement localisé.

Ces deux cas sont illustrés dans la figure II.7 suivante :



**Figure II.7** : Influence de l'énergie cinétique des particules anguleuses  
Sur le processus d'érosion

Il a été montré que l'arrachement de matière par sablage laisse des traces en forme de cratères avec des bavures sur les bords qui permettent une bonne adhésion des revêtements.

Ceci est différent pour le cas des matériaux fragiles qui présentent un aspect d'arrachement très compliqué, à cause de leur grande dureté. Les cratères formés se développent en fonction de l'énergie cinétique des particules projetées.

### **II.4 Paramètres influants sur l'érosion :**

Les facteurs influençant le processus d'érosion doivent être connus afin de caractériser le comportement des matériaux vis-à-vis de l'érosion. Les paramètres pertinents qui influencent l'érosion sont [10] :

1. Effet de La vitesse de projection des particules
2. Effet de L'angle d'impact.
3. Effet de la masse des particules projetées
4. Effet de La forme et de la taille des particules.
5. La nature des matériaux de la particule et de la cible.
6. Effet de la température.
7. Effet de l'énergie cinétique

# PARTIE PRATIQUE

## PARTIE PRATIQUE :

### I. Objectif du travail :

Le but de ce travail est de caractériser un verre plat « Float glass » érodé par sablage.

Pour mener ce travail, nous avons érodé par sablage, des échantillons de verres sodocalciques fabriqués à l'unité MFG (Méditerranéen Float Glass) .

Plusieurs essais ont été réalisés sur ces échantillons de verre avant et après sablage.

Le sablage du verre consiste à injecter par pression et avec une certaine vitesse, une quantité de sable afin d'éroder la surface de verre, et ceci dans le but de voir l'effet du vent du sable sur les pare brises des véhicules dans les régions saharienne.

### II. Moyens utilisés :

#### a) Verre utilisé et préparation des échantillons :

Nous avons utilisé un verre plat de type silico-sodo-calcique, commercialisé dans le marché Algérien et fabriqué par l'unité MFG. La composition chimique moyenne est donnée dans le tableau 1.

A partir d'une même plaque de verre, nous avons prélevé des échantillons de forme carrée de dimensions 30x30 mm avec deux épaisseurs différentes. Les verres nommés **type A** ont une épaisseur de 3 mm et ceux d'épaisseur 5mm sont nommés verres **type B**.

Les éprouvettes ont été érodées par sablage sur une seule face.

**Tableau 1** : Composition chimique moyenne du verre utilisé

Oxydes	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Autres
Valeurs (%)	72,85	12,43	08,15	04,10	01,28	0,48	0,47	0,25

#### b) Sable utilisé :

On a utilisé un sable du Sahara Algérien (Ouaregla). Sa composition chimique contient essentiellement de la silice (73%) et de l'oxyde de sodium (24%). La taille moyenne de grains est de 1000 µm. Généralement, ses grains sont grossièrement de couleur marron qui indique la présence de l'oxyde de fer et que la forme est très variable et irrégulière (il y a deux classes de grains : ceux anguleux et ceux ayant une forme grossièrement sphérique).

#### Caractéristiques du sable utilisé :

Les propriétés moyennes du sable utilisé sont données dans le tableau suivant [10]

**Tableau 2** : Caractéristiques du sable utilisé

Caractéristiques (unités)	Valeurs
Dureté Vickers HV (GPa)	14.49
Densité (g /cm 3)	2.639

c) **Dispositifs utilisés** : Le sablage se fait généralement soit :

- En soufflant des particules de sable sec avec de l'air sec (sablage sec).
- En soufflant les particules de sable avec de la vapeur d'eau ou en présence d'un liquide (sablage humide).[10]

Pour avoir une simulation proche des conditions climatiques réelles qui sévissent au Sahara, nous avons utilisé le sablage sec, avec un dispositif de sablage de type horizontal conçu et réalisé au niveau de notre laboratoire.).

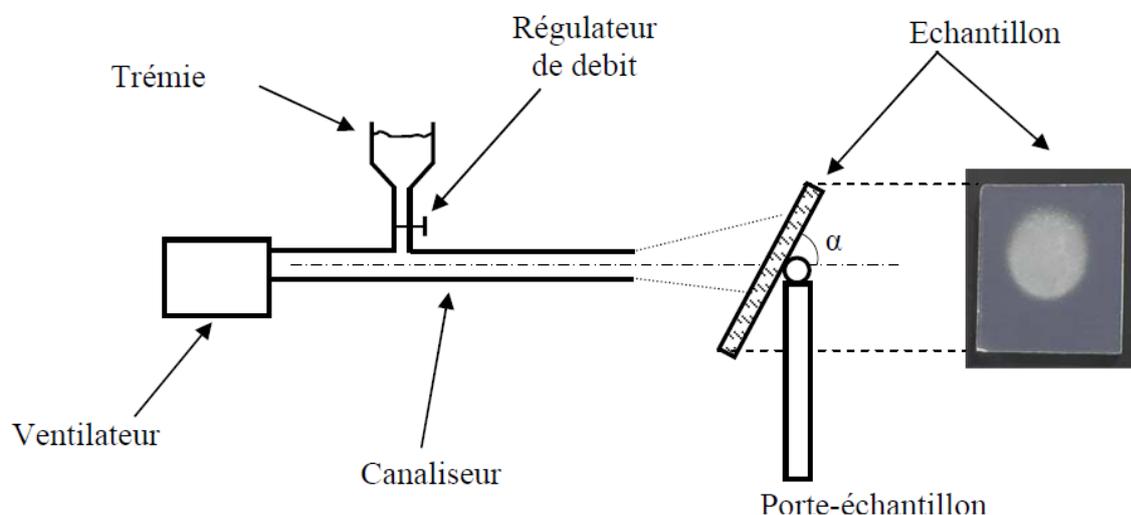
Aussi ; on a utilisé un sablage industriel pour voir son impact sur l'état de surface du verre.

**1 - Dispositif de sablage industriel** : On a utilisé une sableuse industrielle (Société GTP : grand travaux pétroliers à Régaia), travaillant avec une pression de 7 Bar.

**2- Dispositif de sablage réalisé au niveau de laboratoire** : On a réalisé un dispositif de sablage composé des éléments suivants :

- Compresseur à vitesse variable ,
- Une buse de diamètre 4 mm et de longueur 1m.
- Une trémie d'alimentation en sable qui permet de libérer les particules de sable avec un débit variable.
- Le porte échantillon est orientable à 90°. Celui-ci est fixé dans une enceinte qui permet de récupérer le sable utilisé et d'empêcher le sable de s'éparpiller.

Le principe consiste à projeter les particules de sable contre la surface d'un matériau. La figure 1, illustre le schéma de principe du dispositif de sablage utilisé.



**Figure 1** : Schéma de principe du dispositif souffleur de sable utilisé.

### III. Essais de caractérisations :

Les différents essais réalisés sur les échantillons avant et après sablage sont les suivants :

- Détermination de la masse volumique
- Détermination de la masse spécifique
- Détermination de l'absorption
- Détermination de la résistance chimique (Attaque chimique)
- Détermination de la résistance au choc thermique
- Essais de flexion
- Dilatation thermique
- Transmission optique
- Dureté

### Protocol de travail :

#### Caractérisation des verres avant et après sablage :

- Choix des verres sodocalciques type A et type B (selon deux épaisseurs 3 et 5mm).
- Couper des carrés de dimension « 30x30 mm » (selon deux épaisseurs 3 et 5mm).
- Pour les essais de flexion, couper des échantillons de 100mm de longueurs et 10mm de largeurs (selon deux épaisseurs 3 et 5mm).
- Pour la détermination de dilatation thermique, couper des échantillons de 25mm de longueur et 5mm de largeur (selon deux épaisseurs 3 et 5mm).
- Réaliser toutes les essais de caractérisation sur des échantillons non sablés
- Effectuer le sablage :
  - Sablage industriel
  - Sablage au niveau du laboratoire
- Réalisation des essais de caractérisation après sablage

-Comparaison des résultats

- Conclusion

**Caractérisation des verres :**

**III.1-Détermination de la masse volumique (Masse volumique hydrostatique) :**

**Définition :** La masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de son volume. (En tenant compte des pores et capillaires du corps)

**Mode opératoire :**

**Matériaux et équipements**

Les équipements utilisés dans ce travail sont :

- Étuve de séchage.
- Balance technique.
- Balance hydrostatique.
- Bain marie.
- Echantillons de verres (5échantillons de verre plat).

**Réalisation du travail :**

- 1- Sécher le matériau (T=110°C)
- 2- Mettre les échantillons dans le bain marie (T=80°C)
- 3- Après 30 minutes retirer les échantillons, les essuyer avec un chiffon humide et les peser à l'air.
- 4- Fixer les échantillons sur la balance hydrostatique et les peser sous l'eau.
- 5- Calculer la masse volumique

$$M_v = \frac{M_1 \cdot MSP}{M_2 - M_3} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Ou :

Mv : Masse de l'échantillon sec (g)

## PARTIE PRATIQUE

---

M<sub>sp</sub> : Masse spécifique de l'eau (M<sub>sp</sub> = 1g/cm<sup>3</sup>)

M<sub>2</sub> : Masse de l'échantillon saturé pesé à l'air (g)

M<sub>3</sub> : Masse de l'échantillon saturé pesé sous l'eau (g)

### III.2. Détermination de la masse spécifique :

**Définition** : La masse spécifique d'un matériau c'est sa masse par unité de volume sans tenir compte des pores des vides et des capillaires, elle est exprimé en (g/cm<sup>3</sup>) ou bien (kg/m<sup>3</sup>).

#### Matériaux et équipements :

- Pycnomètre de 25 à 50 ml
- Balance
- Mortier et pilons en porcelaine
- Toluène
- Lames de verre

#### Réalisation du travail :

1-Broyer le verre dans une capsule en porcelaine

2-Passer le verre à travers le tamis

3- Peser le pycnomètre à vide préalablement nettoyer et sécher jusqu'à la masse constante G

4-Verser la poudre (5g) dans le pycnomètre G<sub>1</sub>

5-Remplir le pycnomètre avec du toluène, laisser bouillir pendant 30 minutes, refroidir avec un jet d'eau, puis ajouter du toluène jusqu'à la jauge et peser G<sub>2</sub>

6-Evacuer le tout du pycnomètre, remplir avec le toluène jusqu'à la jauge et peser G<sub>3</sub>

7-Calculer la masse spécifique d'après la formule :

$$M_{se} = \frac{(G_1 - G) dt}{G_3 + (G_1 - G) - G_2} \quad \text{g / cm}^3$$

### III.3. Détermination de l'absorption d'eau:

**Définition :** L'absorption est par définition l'ensemble des mécanismes permettant aux substances de pénétrer naturellement dans l'organisme alors qu'elles étaient à l'extérieur.

#### Équipements et matériaux :

- Balance.
- Étuve de séchage.
- Bain marie.
- Echantillons de verres (5 échantillons).
- Eau.

#### Réalisation du travail :

1. Sécher les échantillons (T = 110 °C) ;
2. Mettre les échantillons dans le bain marie (T = 80 °C) ;
3. Après 30 minutes retirer les échantillons, les essuyer avec un chiffon humide et les peser ;
4. Calculer l'absorption d'eau par la formule suivante :

$$A_p = \frac{M_2 - M_1}{M_1} 100\%$$

Où :

M1 : masse d'échantillon sec (g) ;

M2 : masse d'échantillon saturé d'eau.(g)

### III.4. Détermination de résistance chimique :

#### Définition :

La résistance chimique est la résistance des matériaux aux solutions chimiques telles que : solutions acides, solutions basiques et solutions neutres.

#### Mode opératoire :

## PARTIE PRATIQUE

---

- Balance
- Bain marie
- Fiole, bécher, pipettes.
- Echantillons de verres.
- Eau distillée, Acide hydrochloridrique (HCl) , NaOH et Carbonates de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )
- 

### Réalisation du travail (suivant la norme CSN 700533)

1- Préparer 3 solutions de 400 ml.

- a) Solution acide : 1M HCl.
- b) Solution basique : 1M NaOH +  $\frac{1}{2}$   $\text{Na}_2\text{CO}_3$
- c) Solution neutre : eau distillée.

2- Peser les échantillons de verre à sec.

3- Mettre les échantillons de verre dans les solutions préparées.

4- Laisser chauffer pendant 3 heures à 100°C.

5- Après laissé refroidir la solution, retirer les échantillons de verre et les essuyer à l'aide d'un chiffon humide.

6-Calculer la perte de masse d'après la formule :

$$\Delta M = \frac{M_0 - M_1}{M_0} 100\%$$

Où :

$M_0$  : Masse de l'échantillon avant l'attaque.

$M_1$  : Masse de l'échantillon après l'attaque.

$\Delta M$  : Perte de masse résultante de l'action d'attaque.

### III.5-Détermination de la résistance au choc thermique :

#### Définition :

La résistance au choc thermique exprime la différence de température à laquelle un matériau peut être soumis entre son échauffement maximal et son refroidissement.

## PARTIE PRATIQUE

---

On définit le choc thermique comme suit : c'est un brusque changement de température, généralement une diminution brutale. Certains matériaux (le verre par exemple) sont sensibles à ce phénomène qui présente un risque (bris de glace par exemple).

Lors d'un refroidissement rapide, le cœur est encore chaud et la peau qui elle se refroidit, se rétracte, ce qui peut provoquer des fissures. Dans le cas d'un réchauffement rapide, il peut aussi y avoir des fissurations à cause de la différence de température, mais de moindre importance

### Réalisation du travail :

#### Équipements et matériaux :

- Echantillons de verres.
- Etuve de séchage
- Bain d'eau.

#### Mode opératoire :

Maître des lames de verre dans un four (étuve) à  $T_1$ .

Immerger ensuite ses lames dans un bain d'eau à  $T_2$  ( $T_2 < T_1$ ) (durant 2minutes).

La résistance au choc thermique est déterminée par  $\Delta T = T_2 - T_1$  (°C)

### III.6. Détermination de la résistance mécanique (Résistance à la flexion) :

**Définition :** La flexion est la méthode la plus apte à la mesure de la résistance mécanique du verre car l'échantillon ne subit aucune tension causée par serrage.

#### Equipement et matériaux :

- Machine à la flexion.
- Pieds à coulisse.
- Echantillons de verre.

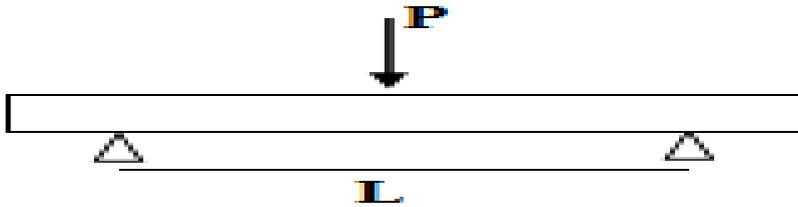
#### Réalisation de travail :

1. Mesurer les dimensions de l'échantillon.

## PARTIE PRATIQUE

---

2. Placer l'échantillon sur les deux appuis de la machine où la charge est appliquée au centre avec un troisième appui (voir figure).



3. Calculer la résistance à la rupture par la formule suivante :

- Echantillon sous forme de plaque :

$$\delta r = \frac{3PL}{2be^2} \text{ (Mpa)}$$

-

Où :

L : longueur entre les deux appuis.

P : force de charge pour la rupture (N).

b : largeur de l'échantillon.

e : épaisseur de l'échantillon (e = 3 mm ou 5mm).

### III.7. Détermination de la dilatation thermique :

#### Définition :

Le coefficient moyen de dilatation thermique linéaire entre deux températures  $t_0$  et  $t_1$  est le rapport, ramené à l'unité de longueur, de l'allongement de l'échantillon à la variation de température correspondante :

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{l - l_0}{t_1 - t_0}$$

$\alpha$  : Coefficient moyen de dilatation thermique linéaire.

$l_0$  : longueur initiale de l'échantillon.

$l$  : longueur finale de l'échantillon

## PARTIE PRATIQUE

On procède au chauffage d'une éprouvette de verre à une température déterminée initialement à la température ambiante. Ensuite, on mesure l'allongement de l'éprouvette entre ces deux températures.

### - Appareillage (Dilatometre) [11] :

Il est composé de :

- Un dilatomètre permet de mesurer la variation de longueur de l'éprouvette avec une erreur maximale de  $0.00002l_0$ , avec un four permettant d'avoir une température constante à  $\pm 1^\circ\text{C}$  sur toute la longueur de l'éprouvette.
- Élément de mesure (par exemple, thermocouple) permettant de déterminer la température à  $1^\circ\text{C}$  près.
- Dispositif de mesure permettant de mesurer la longueur de l'éprouvette avec une erreur maximale de  $0.001l_0$ .

Les différents appareils qui existent se différencient par :

- 1- Leur moyen de détection par (miroir ou autre)
- 2- Leur système d'enregistrement (photographie, enregistrement potentiométrique)
- 3- Leur coefficient d'amplification.

Dans la mesure où le type de verre le permet, la variation de la longueur sera mesurée entre  $20^\circ\text{C}$  (température ambiante) et des températures variables par exemple ( $20^\circ\text{C}$ - $100^\circ\text{C}$ ), ( $20^\circ\text{C}$ - $200^\circ\text{C}$ )...

### - Préparation de l'éprouvette :

La forme de l'éprouvette dépend de l'appareil utilisé. Pour le **dilatometre Dil 402C** utilisé au niveau du laboratoire des ((UR .MPE) Boumerdes), l'éprouvette devra avoir une forme rectangulaire, des surfaces planes et parallèles (longueur maximale de 25mm et épaisseur de 8mm)

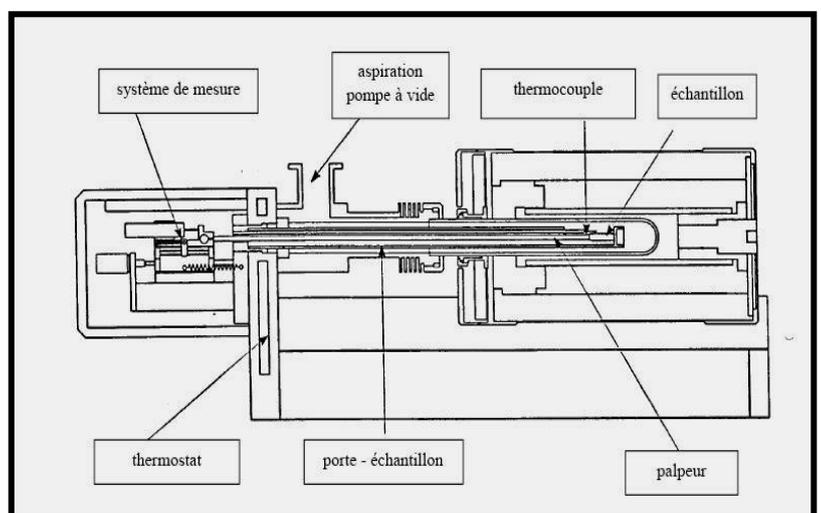


Figure 2 : figure schématique du dilatomètre Dil402C .

## PARTIE PRATIQUE

---

La figure 1 montre le schéma du dilatomètre Dil 402C

L'échantillon est introduit dans l'appareil sous forme de l'éprouvette de dimensions normalisées, qui sera guidé ensuite à l'aide d'une source chargée de faire des poussées horizontales pendant le chauffage. Un échantillon (en alumine) de longueur égale à celle de l'éprouvette est généralement utilisé comme référence standard.

Pour avoir de bonnes informations, il faut que la température soit uniforme à travers l'échantillon du matériau a étudié et celui de référence, les deux devront avoir des surfaces planes et parallèles.

Les caractéristiques techniques du dilatomètre Dil 402C (NETZSCH) sont :

- Intervalle de température : -160°C...2000°C
- Sensibilité : 1 digit/1.25 nm
- Vitesse de chauffage utilisée : 5°K/min
- Atmosphère de l'échantillon : statique/ dynamique/ vide/ quelques gaz non toxiques, inflammables, non explosives.
- Dimensions de l'échantillon : longueur : max.25mm, diamètre : max.12mm (forme d'un tube) ou max.8mm (forme rectangulaire)

### III.8. Détermination de la transmission optique :

#### Définition :

**Transmission et absorption des verres :** En règle générale, c'est la transmittance du verre qui est donnée par le fabricant, notée  $\tau_i$  ou  $T_i$ , valeur dépendante de l'épaisseur du matériau et dont la mesure permet de prendre en compte la perte de transmission due à l'absorption et à la diffusion par les défauts internes du verre. Le terme de transmittance prenant en compte l'indice de réfraction via le coefficient de Fresnel, il est aussi dépendant de la longueur d'onde et de l'épaisseur de l'échantillon.

Les fenêtres de transmission sont particulièrement intéressantes pour choisir le verre adéquat dans des domaines d'application comme le lointain infrarouge ou le lointain ultraviolet. Ces fenêtres sont la conséquence de l'absorption des matériaux constituant le verre, qui croît dans l'infrarouge et dans l'ultraviolet. L'absorption dans ces deux domaines de longueurs d'onde est due à des phénomènes distincts et peut évoluer différemment selon les conditions environnementales

## PARTIE PRATIQUE

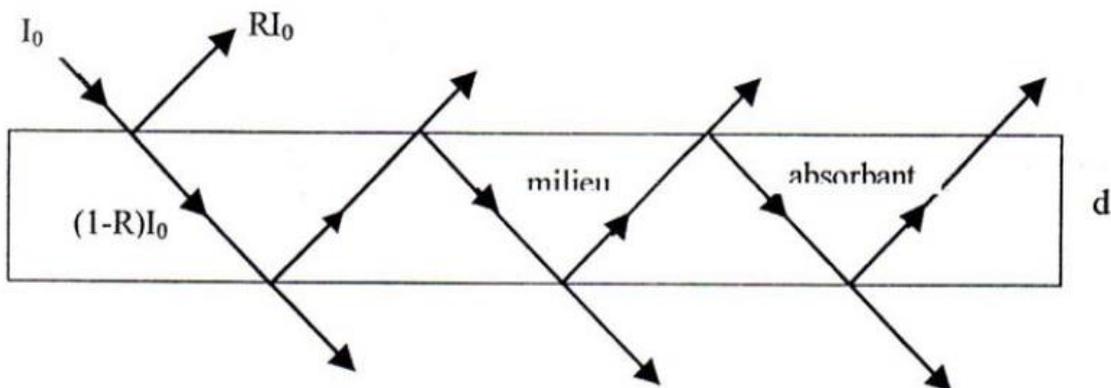
### Le spectrophotomètre :

Les mesures de l'absorption ou transmission ont été réalisées par un spectromètre de type **Perkin Elmer (Lambda EZ210)** à l'unité (MFG) utilisable dans le UV-visible et proche infra rouge (190-1100 nm).

Celui-ci fonctionne par comparaison de deux faisceaux qui traversent la surface du matériau.

### - Principe de travail :

La formule de base est celle du coefficient de transmission d'un film mince d'épaisseur  $d$ , de milieu absorbant, à faces parallèles, séparé par deux milieux semi infini non absorbant. L'un d'eux étant l'air, l'autre le verre. Le faisceau incident subit des réflexions multiples aux interfaces [11] (**figure 2**)



**Figure 3 :** Transmission d'une lame absorbante à faces parallèles [11]

Si  $R$  est le coefficient de réflexion et  $\alpha$  le coefficient d'absorption du milieu absorbant, l'intensité transmise  $I$  sera donnée par :

$$I = [(1-R)^2 \exp(-\alpha d) + R^2 (1-R)^2 \exp(-3\alpha d) + R^4 (1-R)^2 \exp(-5\alpha d) + \dots] I_0 \dots$$

$$\text{Soit } I = \frac{(1-R)^2 \exp(-\alpha d)}{1 - R^2 \exp(-2\alpha d)} I_0$$

## PARTIE PRATIQUE

---

Le coefficient d'absorption optique  $\alpha$  est relié au facteur de transmission par la relation :

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{(1 - R)^2 \exp(-\alpha d)}{1 - R^2 \exp(-2\alpha d)}$$

L'erreur faite est nettement inférieure à 25 %. L'expression de T se réduit généralement à :

$$T \approx (1 - R)^2 \exp(-\alpha d) \text{ avec } R = \left( \frac{1 - n}{1 + n} \right)^2$$

n est l'indice de réfraction.

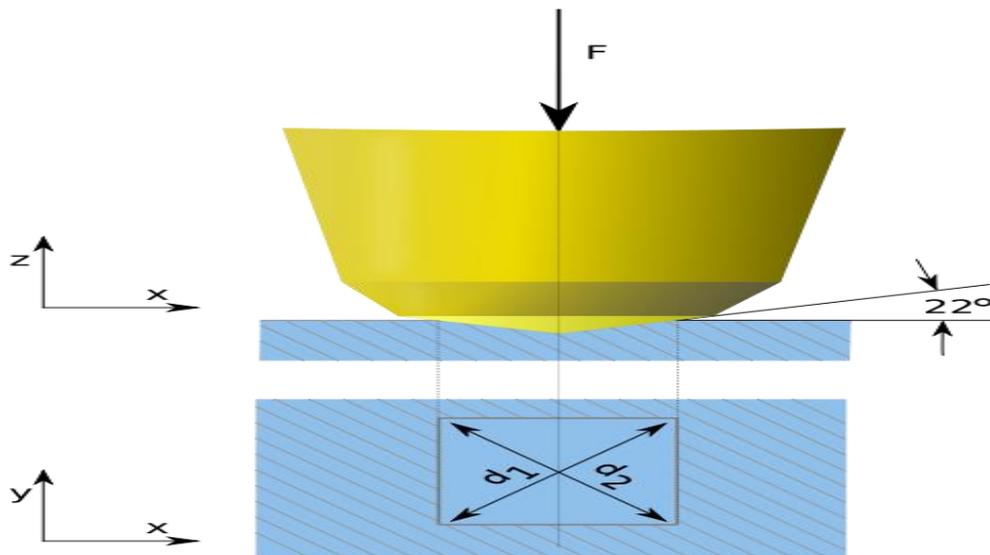
### III.9. Détermination de la dureté des verres :

**Définition :** La dureté est une qualité physique indiquant la résistance au toucher, à la pression, au choc et à l'usure ; elle caractérise le minéral, le métal, les matériaux, l'eau et les aliments.

La mesure de dureté Vickers se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à  $136^\circ$ . L'empreinte a donc la forme d'un carré ; on mesure les deux diagonales  $d_1$  et  $d_2$  de ce carré à l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur d en effectuant la moyenne de  $d_1$  et  $d_2$ . C'est d qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également normalisées.

$$HV \cong 0,189 \cdot \frac{F}{d^2}$$

<b>HV</b>	=	Dureté Vickers
<b>F</b>	=	Force appliquée[N]
<b>d</b>	= Moyenne des diagonales de l'empreinte [mm]	



**Figure 4** : Principe de la dureté Vickers

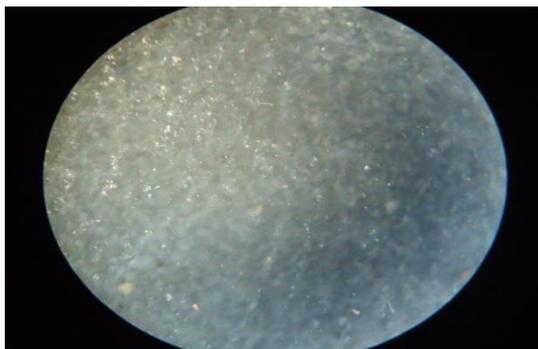
### **Duromètre « Equotip » :**

Le Duromètre Equotip est idéal pour une méthode d'essai simple et directe. Sans câble ni plate-forme d'affichage séparée, c'est un testeur de rebondissement portable, économique et facile à utiliser qui mesure les différentes duretés HV, HB, HR

Il donne les résultats directement après cinq fois de mesure. On a utilisé ce Duromètre pour la mesure de dureté Vickers (HV). ; il faut choisir des surfaces planes et propres.

### **III.10 Aspect des échantillons :**

On a utilisé le microscope optique pour voir les aspects des différents échantillons vitreux avant et après sablage :



**Figure 5** : Verre A

## PARTIE PRATIQUE

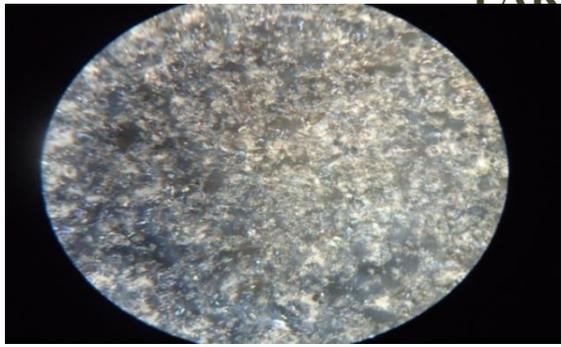


Figure 6 : Verre A30

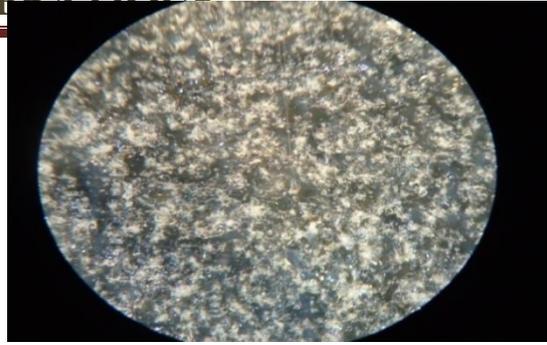


Figure 7 : Verre A50

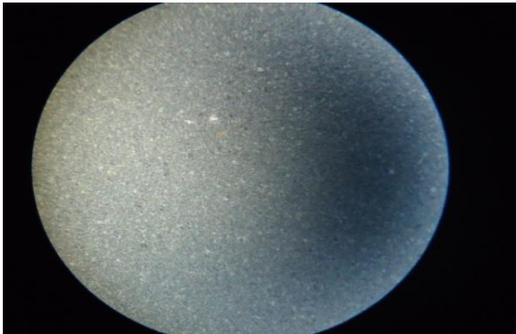


Figure 8 : Verre A'30

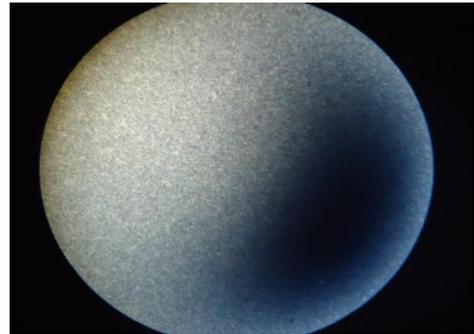


Figure 9 : Verre A'50

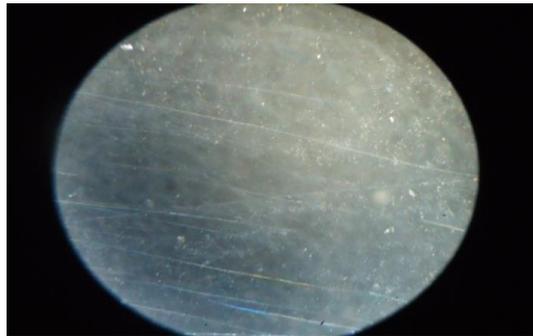


Figure 10 : Verre B

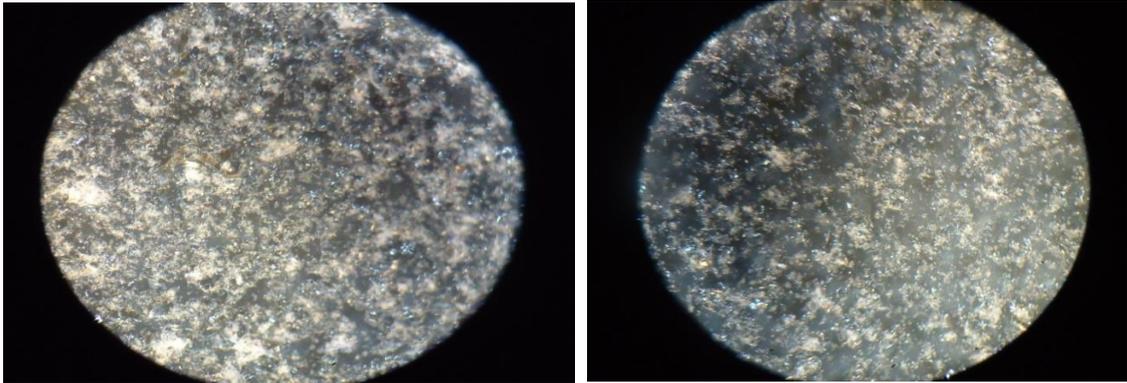


Figure 11 : Verre B30

Figure 12 : Verre B50

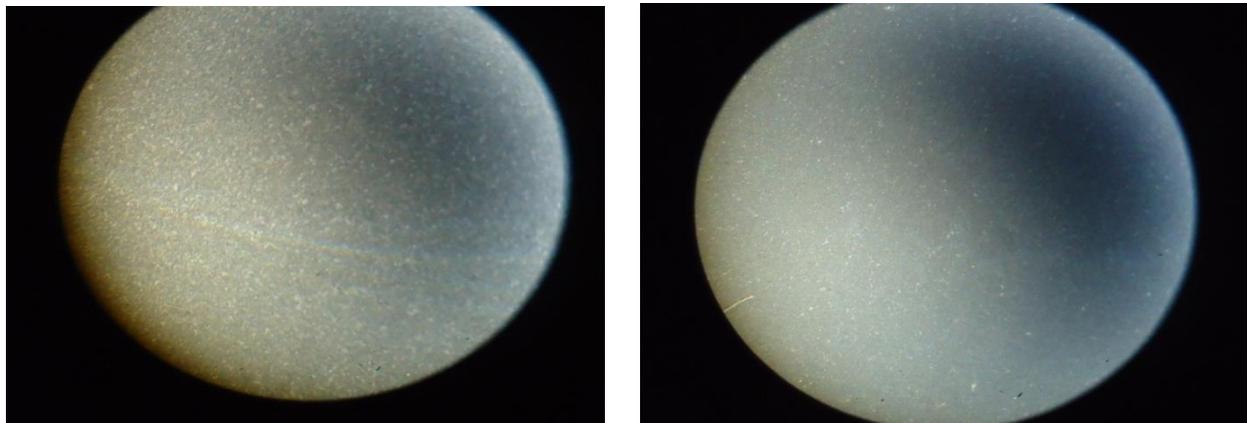


Figure 13 : Verre B'30

Figure 14 : Verre B'50

**Interprétation :** On remarque que le sablage a affecté la morphologie des verres d'une façon très remarquable, les grains de sable projetés ont érodé la surface du verre et se sont insérés à l'intérieur de la structure vitreuse, cependant le sablage par machine industriel le était très fort et a modifié la surface du verre plus que le sablage par le dispositif du sablage réalisé au niveau de laboratoire ; donc la vitesse de projection influe énormément sur la manière d'érosion du verre.

## PARTIE PRATIQUE

---

### IV. Résultats des essais réalisés :

#### A° Caractérisation des échantillons de verre avant sablage :

##### IV.A.1 La masse volumique (hydrostatique):

**Résultats :** On a effectué l'essai sur Cinq échantillons vitreux

Pour l'échantillon A avec épaisseur de 3mm

Echantillon A	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )
1	2.5176
2	2.4734
3	2.4849
4	2.4959
5	2.4179

On a trouvé :  $M_v(A) = 2.4779 \text{ g/cm}^3$

Pour l'échantillon B avec épaisseur de 5mm

Echantillon B	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )
1	2.4066
2	2.3961
3	2.3956
4	2.4066
5	2.3000

On a trouvé :  $M_v(B) = 2.3809 \text{ g/cm}^3$

#### Interprétation :

En comparant les deux masses volumiques des deux échantillons A et B qui sont des verres plats sodocalciques de mêmes compositions chimiques, mais de différentes épaisseurs, on

## PARTIE PRATIQUE

---

remarque que le verre le plus épais (Verre B) est moins dense que le verre le moins épais (Verre A) ; Ceci est dû aux grands volumes des échantillons B par rapport aux échantillons A , donc la masse par unité de volume (qui est la masse volumique) est plus grande pour les verres A que les verres B ;

### IV.A.2 La masse spécifique :

#### Résultats :

Pour l'échantillon A avec épaisseur de 3mm

Echantillon A	Valeur	Masse spécifique (g/cm <sup>3</sup> )
	G= 29.7100	<b>2.3134</b>
	G1= 34.7609	
	G2= 76.2515	
	G 3= 73.0935	

Pour l'échantillon B avec épaisseur de 5mm

Echantillon B	Valeur	Masse spécifique (g/cm <sup>3</sup> )
	G= 29.7428	<b>2.281 0</b>
	G1= 33.9682	
	G2= 75.7130	
	G 3= 73.0935	

On a trouvé :                    **Ms (A) =2.3134 g/cm<sup>3</sup>**

**Ms (B) =2.2810 g/cm<sup>3</sup>**

#### Interprétation :

Puisque les volumes des échantillons B sont plus grands que ceux des échantillons A, et la masse spécifique par définition est la masse par unité de volume sans tenir compte des pores et capillaires, donc elle sera plus grande pour les échantillons A.

## PARTIE PRATIQUE

---

### IV.A.3. Détermination de l'absorption d'eau:

#### Résultats :

Pour l'échantillon A avec épaisseur de 3mm

Echantillon A	M1(g)	M2(g)
1	6.3012	6.3019
2	6.0648	6.0652
3	6.6238	6.6244
4	5.9174	5.9179
5	6.8023	6.8030

On a trouvé :  $A_p(A) = 0.058\%$

Pour l'échantillon B avec épaisseur de 5mm

Echantillon B	M1(g)	M2(g)
1	10.9311	10.9314
2	10.7213	10.7215
3	11.2015	11.2016
4	11.3400	11.3404
5	10.6480	10.6486

On a trouvé :  $A_p(B) = 0.032\%$

#### Interprétation :

Les échantillons vitreux étudiés présentent de faibles valeurs d'absorptions d'eau, à cause de leurs faible porosité, mais on remarque bien que les échantillons les moins épais (A) absorbent l'eau plus que les échantillons volumineux (B), ceci est expliquer par les faibles épaisseurs des échantillons (A) qui facilitent la diffusion et l'absorption des molécules d'eau par rapport les plus grandes épaisseurs.

## PARTIE PRATIQUE

---

### IV.A.4. Détermination de résistance chimique :

-Attaque en milieu acide :

Echantillon	M0	M1	%
A	1.9063	1.9055	0.0419 %
B	1.2795	1.2790	0.0390 %

-Attaque en milieu basique :

Echantillon	M0	M1	%
A	1.1967	1.1954	0.1086 %
B	2.0883	2.0872	0.0526 %

-Attaque en milieu neutre :

Echantillon	M0	M1	%
A	1.1252	1.1250	0.0177 %
B	1.6383	1.6383	0.000 %

### Interprétation des résultats :

**Action de l'acide (HCl):** Les acides sont caractérisés par la présence des ions  $H^+$  ou  $H_3O$  et le verre sodo-calcique est caractérisé par la présence des modificateurs ( $Na_2O$ ,  $K_2O$ ....) qui peuvent migrer d'un vide à un autre et passer dans la solution qui les entoure ; On observe une faible attaque dans l'acide (échange ionique verre modificateur –solution ion  $H^+$ )

**Action de la base ( $NaOH+Na_2CO_3$ ):** Dans les solutions basiques, l'ion  $OH^-$  réagit avec le réseau, donc il apparait des coupures de réseau (dissolution du verre)

**Action de l'eau :** L'action de l'eau sur le verre, commence d'abord par un échange d'ion alcalin avec l'ion  $H^+$  qui mène à une diminution du nombre des  $H^+$  de l'eau qui devient alcaline et qui provoque des coupures de réseau et par conséquent une dissolution du verre.

Pour les verres A et B, on a trouvé que l'attaque de la solution basique était plus forte (coupures du réseau), ensuite l'attaque par acide était plus faible et moindre par solution neutre (eau).

## PARTIE PRATIQUE

---

Les verres A sont plus attaqués par rapport les verres B à cause de leur faibles épaisseurs d'où une diffusion plus rapide des solutions d'attaques dans les verres A.

### IV.A.5. Détermination de la résistance au choc thermique :

#### Résultats :

Température (°C)	T1	Température (°C)	T2	$\Delta T$ (°C)	Observation (Echantillon A)	Observation (Echantillon B)
110		25		85	Rien	Apparition de fissures
120		25		95	Rien	Apparition de fissures
130		25		105	Rien	Apparition de plus de fissures
140		25		115	Apparition de fissures	Apparition de plus de fissures
150		25		125	Apparition de plus de fissures	Apparition de plus de fissures

#### Interprétation :

D'après les essais du choc thermique réalisés, on voit bien que le verre A résiste beaucoup plus au choc thermique que le verre B, ceci est dû à sa faible épaisseur en le comparant avec le verre B, qui a une plus grande épaisseur donc quand ce dernier verre subit un choc thermique, la différence de température entre le cœur et la surface de ce verre est plus importante que celle dans le verre A (qui a une faible épaisseur), donc il se brisera rapidement.

## PARTIE PRATIQUE

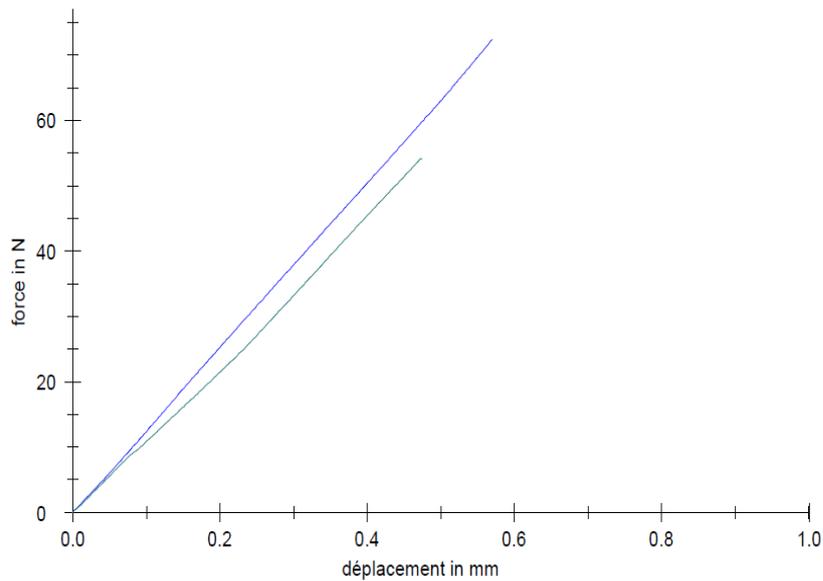
---

### IV.A.6. Détermination de la résistance mécanique (Résistance à la flexion) :

#### Résultats :

#### Echantillon A (e = 3mm) :

On a réalisé l'essai de flexion pour deux échantillons d'épaisseur 3mm ; les courbes enregistrées sont présentées dans la figure suivante :



**Figure 15:** Essai de flexion réalisé sur les échantillons A

#### Interprétation :

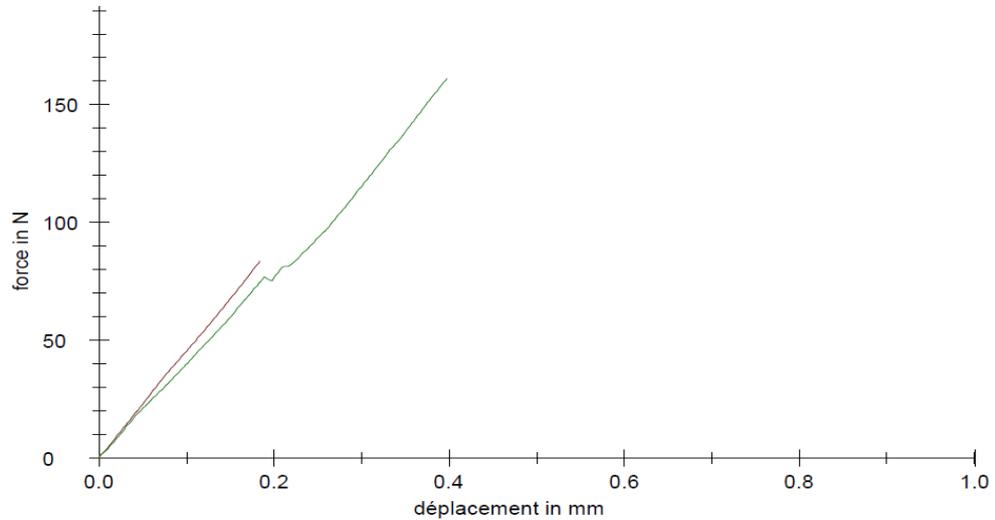
Le verre est un matériau fragile, on voit que pour un déplacement maximale de 0.6mm, la force nécessaire à la rupture est d'environ 72.44 N et un déplacement de 0.5 mm , la force est de 54.15 N

## PARTIE PRATIQUE

---

### Echantillon B (e = 5mm) :

On a réalisé l'essai de flexion pour deux échantillons d'épaisseur 5 mm ; les courbes enregistrées sont présentées dans la figure suivante :



**Figure 16:** Essai de flexion réalisé sur les échantillons B

### Interprétation :

On voit que pour un déplacement maximal de 0.4mm, la force nécessaire à la rupture est d'environ 161.16 N et un déplacement de 0.2 mm, la force est de 83.64 N.

Donc si on compare les deux verres A et B, on trouve que les verres B nécessitent plus de forces de ruptures pour de faibles déplacements, ceci montre que les verres B résistent mieux mécaniquement que les verres A ; une grande épaisseur permet une bonne résistance à la flexion du verre.

### IV.A.7. Détermination de la dilatation thermique :

#### Résultats :

# PARTIE PRATIQUE

Echantillon A (e = 3mm) :

Courbe de dilatation thermique enregistrée :

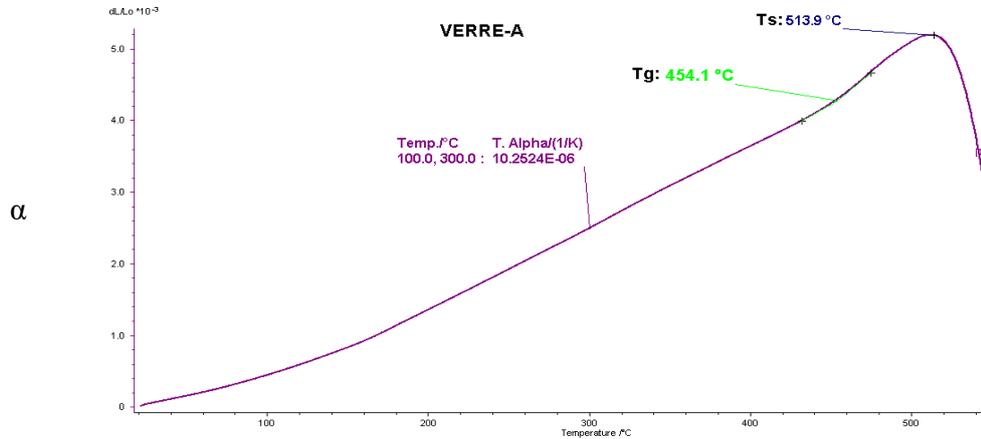


Figure 17 : Courbe de dilatation thermique du verre A

D'après la courbe de dilatation thermique du verre A, on a trouvé les valeurs suivantes :

- Température de transition vitreuse  $T_g = 454.1^{\circ}\text{C}$
- Température de déformation dilatométrique  $T_s = 513.9^{\circ}\text{C}$
- Le coefficient de dilatation thermique dans l'intervalle  $[100, 300^{\circ}\text{C}]$  est :  
 $\alpha = 10.25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Echantillon B (e = 5mm) :

Courbe de dilatation thermique enregistrée :

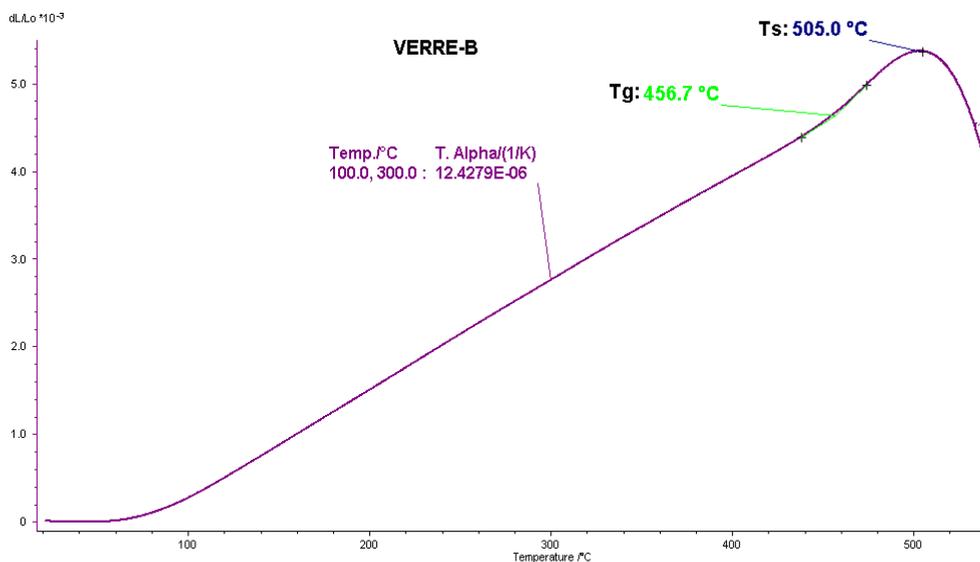


Figure 18 : Courbe de dilatation thermique du verre B

## PARTIE PRATIQUE

D'après la courbe de dilatation thermique du verre A, on a trouvé les valeurs suivantes :

- Température de transition vitreuse  $T_g = 456.7^\circ\text{C}$
- Température de déformation dilatométrique  $T_s = 505.0^\circ\text{C}$
- Le coefficient de dilatation thermique dans l'intervalle  $[100, 300^\circ\text{C}]$  est :  
 $\alpha = 12.42 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

### Interprétation :

On remarque d'abord que les deux valeurs des coefficients de dilatation thermiques de ces verres sont au dessus de  $6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , donc ils ne sont pas des verres thermorésistants, ces verres appartiennent à la famille des verres sodocalciques qui ne résistent pratiquement pas beaucoup au choc thermique (destinés principalement à la construction)

Le coefficient de dilatation thermique de l'échantillon B est plus grand que celui de l'échantillon A, donc la résistance thermique du verre A est plus élevée que le verre B (on l'a prouvé avec l'essai du choc thermique). Même la température de déformation du verre A est plus grande que celle du verre B.

On peut dire donc qu'une faible épaisseur du verre, permet d'avoir une faible dilatation thermique et donc une meilleure résistance au choc thermique.

### IV.A.8. Détermination de la transmission optique :

**%TL ou % T** : Transmission lumineuse domaine visible

Pour le verre A : **%T=90.56**

Pour le verre B : **%T=89.57**

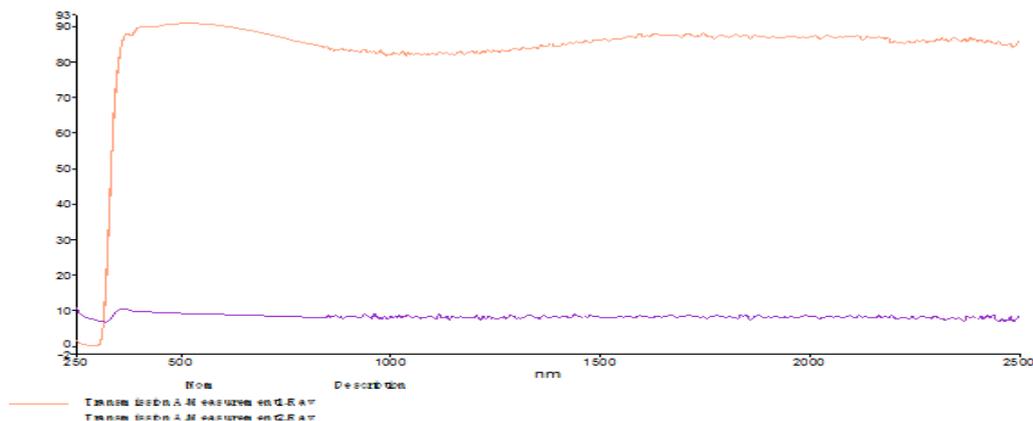


Figure 19: Courbe de transmission du verre A

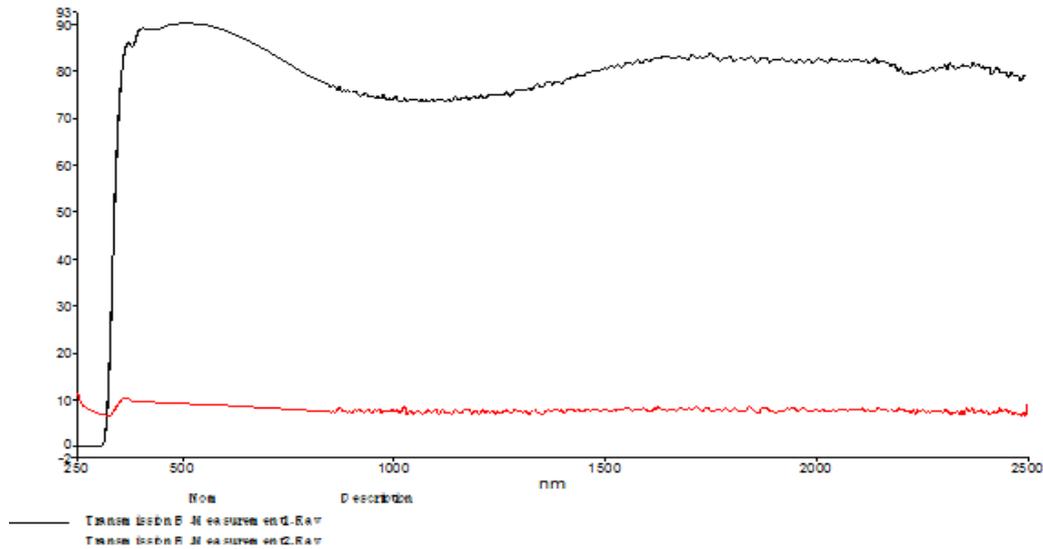


Figure 20 : Courbe de transmission du verre B

### Interprétation :

Pour le verre A, cette valeur est grande et pour une telle épaisseur (2.87mm), indique une bonne transparence du verre float glass fabriqué. Elle diminue pour une plus grande épaisseur comme le cas du verre B (4.99mm). Donc la transmission de lumière est influencée par l'épaisseur qui participe à la réflexion de lumière.

### IV.A.9. Détermination de la dureté des verres :

#### Résultats

#### Echantillon A (e = 3mm)

Comme la plaque de verre A est très lisse et présente de faible épaisseur, l'appareil Equotip n'a pu difficilement mesurer sa dureté,

On a trouvé une valeur de :

$$H_v = 93 \text{ Kgf/mm}$$

## PARTIE PRATIQUE

---

### Echantillon B (e = 5mm)

Par contre pour l'échantillon B, l'appareil a bien défini la dureté Vickers et on trouvé une dureté moyenne de :

$$H_v = 206.66 \text{ Kgf/mm}^2$$

### Interprétation :

Le verre B est plus dur que le verre A, l'épaisseur donc augmente la dureté de surface du verre.

### B° Caractérisation des échantillons sablés par sableuse industrielle :

On a effectué l'essai de sablage par une sableuse industrielle avec une pression de 7 Bar ;  
Utilisant un sable d'Ouargla.

Deux distances entre la buse de la sableuse et le verre à érodé ont été choisies :

- Une distance de 30cm, verres appelés A30 (e=3mm) et B30 (e =3mm)
- Une distance de 50cm, verres appelés A50 (e=5mm) et B50 (e =5mm)

Les mêmes essais de caractérisations on été réalisés pour ces échantillon ;

On a obtenu les résultats suivants :

#### IV.B.1 La masse volumique (hydrostatique):

**Résultats :** On a effectué l'essai sur deux échantillons vitreux de chaque type de verre.

Pour l'échantillon (A30), verre avec épaisseur de 3mm et la distance de sablage est de 30 cm

Echantillon A30	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )
1	2.4965
2	2.4911

## PARTIE PRATIQUE

---

On trouve :  $Mv (A30) = 2.4938 \text{ g/cm}^3$

Pour l'échantillon (A50), verre avec épaisseur de 3mm et la distance de sablage est de 50 cm

Echantillon A50	Masse volumique ( $\text{g/cm}^3$ )
1	2.4956
2	2.4912

On trouve :  $Mv (A50) = 2.4934 \text{ g/cm}^3$

Pour l'échantillon (B30), verre avec épaisseur de 5mm et la distance de sablage est de 30 cm

Echantillon B30	Masse volumique ( $\text{g/cm}^3$ )
1	2.4899
2	2.4757

On trouve :  $Mv (B30) = 2.4828 \text{ g/cm}^3$

Pour l'échantillon (B50), verre avec épaisseur de 5mm et la distance de sablage est de 50 cm

Echantillon B50	Masse volumique ( $\text{g/cm}^3$ )
1	2.4562
2	2.4986

On trouve :  $Mv (B50) = 2.4774 \text{ g/cm}^3$

### **Interprétation :**

En comparant d'abord les verres selon les épaisseurs, on remarque toujours que les verres de 5mm d'épaisseurs sont moins denses que les verres de 3mm d'épaisseur (grand volume) ; Si on compare les verres A30 et A50, on remarque que  $Mv (A30)$  est supérieure à la  $Mv (A50)$  La même chose, si on compare les verres B30 et B50, on remarque que  $Mv (B30)$  est supérieure à la  $Mv (B50)$  ; ceci peut être expliqué par le fait d'éroder la surface du verre du plus près (30cm), ça cause une densification du verre probablement par l'effet des particules sableuses ou des débris de verres cassés qui se figent à l'intérieur de l'échantillon vitreux.

## PARTIE PRATIQUE

Maintenant, si on compare les masses volumiques avant et après sablage, on trouve qu'après sablage la masse volumique a augmenté, donc le sablage densifie le verre (Remplissage du vide par les particules sableuses)

### IV.B.2 La masse spécifique:

#### Résultats :

Pour l'échantillon A 30

Echantillon A30	Valeur (g)	Masse spécifique (g/cm <sup>3</sup> )
	G= 16.8755	<b>2.9038</b>
	G1= 21.8710	
	G2= 77.3585	
	G 3= 74.0833	

Pour l'échantillon A50

Echantillon A50	Valeur(g)	Masse spécifique (g/cm <sup>3</sup> )
	G= 29.7149	<b>2.5563</b>
	G1= 34.6058	
	G2= 76.1291	
	G 3= 72.8970	

Pour l'échantillon B 30

Echantillon B30	Valeur(g)	Masse spécifique (g/cm <sup>3</sup> )
	G= 29.7549	<b>2.6704</b>
	G1= 34.7450	
	G2= 76.2020	
	G 3= 72.8570	

## PARTIE PRATIQUE

---

Pour l'échantillon B50

Echantillon B50	Valeur(g)	Masse spécifique (g/cm <sup>3</sup> )
	G= 30.1600	<b>2.1120</b>
	G1= 35.2309	
	G2= 76.0800	
	G 3= 73.0910	

### Interprétation :

On remarque que les masses spécifiques après sablage sont plus grandes qu'avant sablage, donc l'érosion des verres par les particules sableuses, favorise le remplissage de l'unité de volume par les masses des particules fines projetées ou les débris de verre cassés.

En comparant entre les mêmes types de verres de mêmes épaisseurs mais à différentes distances de sablage (A30 et A50) ou (B30et B50), on trouve que plus la distance du sablage et proche, plus est grande la masse spécifique.

### IV.B.3. Détermination de l'absorption d'eau:

#### Résultats :

On a réalisé l'essai d'absorption pour un seul échantillon de chaque type de verre

Echantillon	M1 (g)	M2(g)	Ap %
A30	6.7290	6.7306	0.02377
A50	5.3899	5.3916	0.03154
B30	11.1364	11.1378	0.01257
B50	11.0994	11.1012	0.01621

### Interprétation :

On remarque que les échantillons les moins épais (A) absorbent l'eau plus que les échantillons volumineux (B), à cause de leurs faibles épaisseurs qui facilitent la diffusion et l'absorption des molécules d'eau.

Après sablage, l'absorption d'eau a diminué, ceci est expliqué par la densification des échantillons vitreux après sablage et l'insertion des particules sableuses entre les vides ce qui empêche et ralentit la diffusion des molécules d'eau.

## PARTIE PRATIQUE

En comparant les résultats d'absorptions des échantillons d'après la distance de sablage, on réalise que les échantillons qui sont proches de la source de sablage absorbent moins d'eau car ils sont plus denses.

### IV.B.4 Détermination de la résistance chimique:

-Attaque en milieu acide :

Echantillons	M0 (g)	M1 (g)	$\Delta M = \frac{M_0 - M1}{M_0} 100\%$
A30	3.3168	3.3124	0.1326 %
A50	2.8634	2.8565	0.2409 %
B30	6.8625	6.8130	0.7210 %
B50	3.7359	3.7355	0.0107 %

-Attaque en milieu basique :

Echantillons	M0 (g)	M1 (g)	$\Delta M = \frac{M_0 - M1}{M_0} 100\%$
A30	3.2416	3.2404	0.0370 %
A50	2.4605	2.4602	0.0121 %
B30	4.1706	4.1694	0.0280 %
B50	3.7161	3.7159	0.0053 %

-Attaque en milieu neutre :

Echantillons	M0 (g)	M1 (g)	$\Delta M = \frac{M_0 - M1}{M_0} 100\%$
A30	3.4911	3.4906	0.0143 %
A50	3.0622	3.0622	0.000 %
B30	7.1553	7.1528	0.034 %
B50	3.8684	3.8673	0.028 %

### Interprétation des résultats :

Pour une bonne interprétation des résultats, il faut avoir les mêmes conditions et les mêmes paramètres d'attaques chimiques (pH, température, le rapport entre surface et volume

## PARTIE PRATIQUE

d'échantillon qui doit être constant..), cependant on n'a pas pris les mêmes masses donc les valeurs des résultats sont un peu éparpillées ; d'habitude l'attaque par base est plus forte pour les verres que l'attaque par acide, car la première s'effectue avec dissolution du réseau vitreux suite à la réaction des ions  $\text{OH}^-$  de la base avec le réseau vitreux (coupures des liaisons), alors que la deuxième attaque s'effectue par un mécanisme d'échange ionique entre des ions  $\text{H}^+$  ou  $\text{H}_3\text{O}^+$  de l'acide et les ions modificateurs de réseau, mais dans notre cas, pour les échantillons sablés, on a remarqué que c'est le contraire, c'est à dire que l'attaque par acide était plus forte que celle par base, on peut expliquer ceci par le fait que les grains de sable projetés par le mécanisme de sablage, se sont insérées à l'intérieur de la structure vitreuse et ont réalisé une couche protectrice à la surface du verre ce qui a consolidé la structure et l'attaque par base était plus faible (en la comparant avec échantillons avant sablage) ; par contre les ions  $\text{H}^+$  de l'acide ont facilement entré dans les vides provoqués par le sablage (faible taille) et ont facilement établis les changements ioniques avec les modificateurs ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ....).

### IV.B.5. Détermination de la résistance au choc thermique :

#### Résultats :

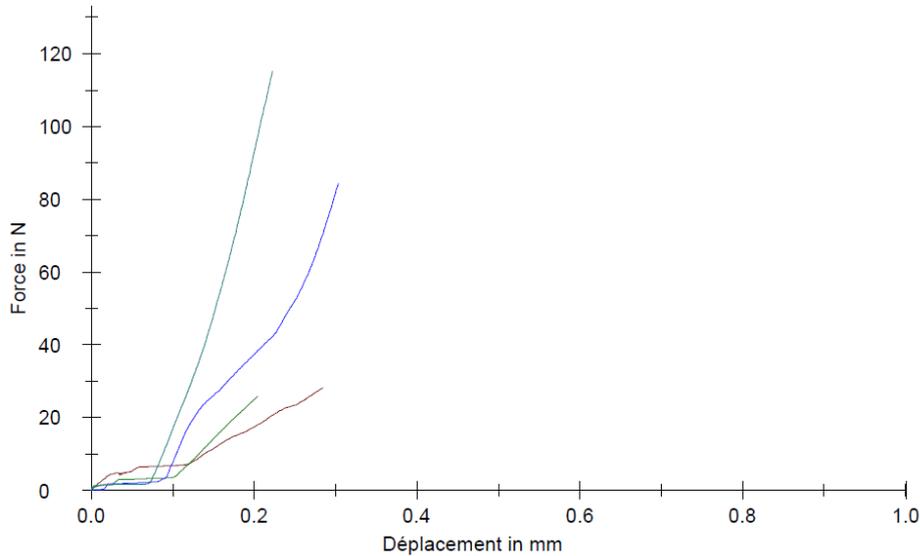
Température T1 (°C)	Température T2 (°C)	$\Delta T$ (°C)	Observation (A30)	Observation (A50)	Observation (B30)	Observation (B50)
110	25	85	Rien	Rien	Apparition de fissures	Apparition de fissures
120	25	95	Fissures	Fissures	Fissures	Fissures

#### Interprétation :

Pour l'essai du choc thermique, on a réalisé l'apparition des fissures rapidement sur les verres sablés par rapport aux verres non sablés. Mais les échantillons B présentent plus de fissures que les échantillons A, ceci est dû à leur grande épaisseur donc la différence de température entre le cœur et la surface de ces verres est plus importante que celles dans les verres A (qui a une faible épaisseur), donc ils se briseront plus rapidement.

## IV.B.6. Détermination de la résistance mécanique (Résistance à la flexion) :

### Résultats :



**Figure 21** : Essai de flexion réalisés sur les échantillons A30, A50, B30 et B50.

### Tableau : Forces maximales appliquées de flexion

Echantillon	A30	A50	B30	B50
<b>Fmax (N)</b>	28.09	25.80	84.34	115.26

### Interprétation :

On remarque qu'après sablage, les valeurs de la résistance mécanique à la flexion deviennent nettement plus faibles.

Cette différence de valeurs entre les deux états du verre peut s'expliquer par le fait que :

- Dans le cas du verre brut, ce sont les microfissures préexistantes qui sont la source de la valeur de la résistance. Il a été montré que les tailles de ces fissures naturelles sont très faibles

## PARTIE PRATIQUE

[10]. Elles sont nettement inférieures à celles des défauts causés par le sablage et qui peuvent dépasser en profondeur 30  $\mu\text{m}$ . Dans le cas du verre sablé, la résistance mécanique chute à cause des défauts de sablage.

On comparant les valeurs de résistances trouvées pour les verres A et B, on trouve que les verres B résistent plus que les verres A à cause de leur plus grande épaisseur qui rend la surface comprimée plus grande et de ce fait elle oppose une meilleure résistance que pour les verres à faibles épaisseurs.

### IV.B.7. Détermination de la dilatation thermique :

Résultats :

Echantillon A 30 :

Courbe de dilatation thermique enregistrée :

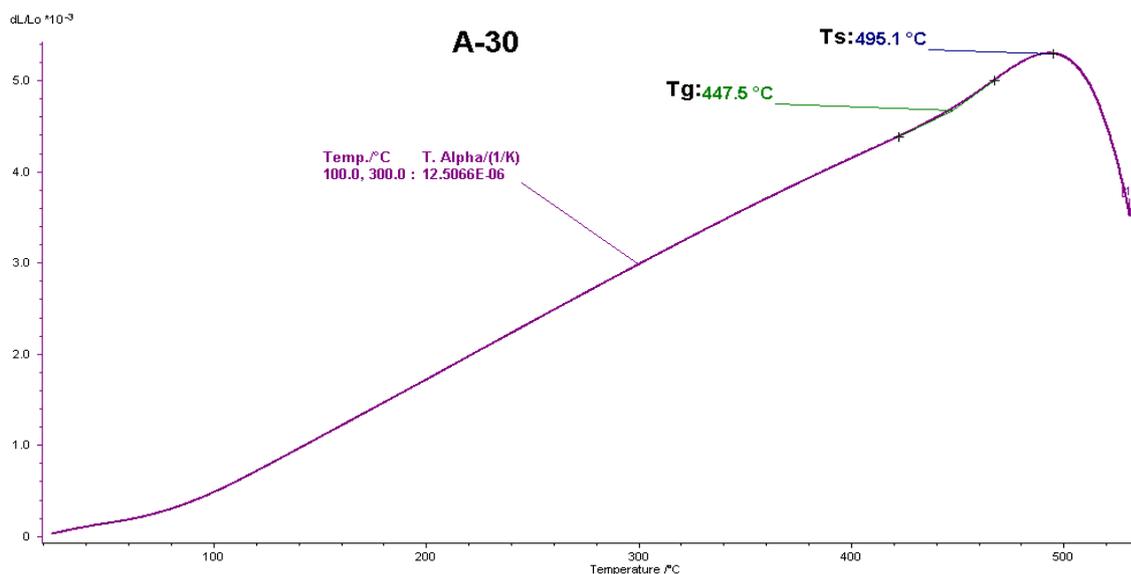


Figure 22 : Courbe de dilatation thermique du verre A30

D'après la courbe de dilatation thermique du verre A30, on a trouvé les valeurs suivantes :

- Température de transition vitreuse **Tg=447.5 °C**
- Température de déformation dilatométrique **Ts= 495.1 °C**
- Le coefficient de dilatation thermique dans l'intervalle [100, 300°C] est :

$$\alpha = 12.50 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

## PARTIE PRATIQUE

Echantillon A 50 :

Courbe de dilatation thermique enregistrée :

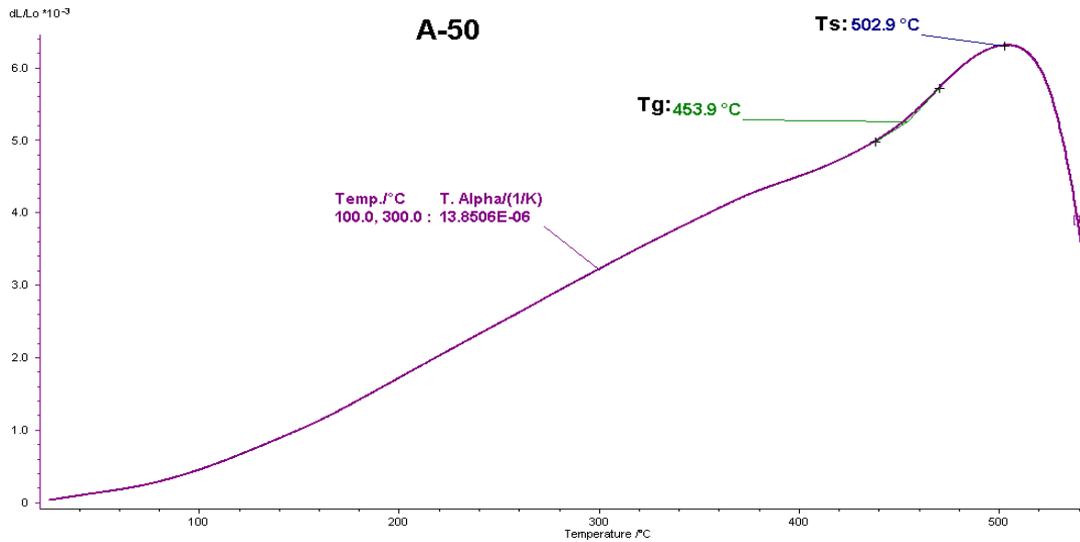


Figure23 : Courbe de dilatation thermique du verre A50

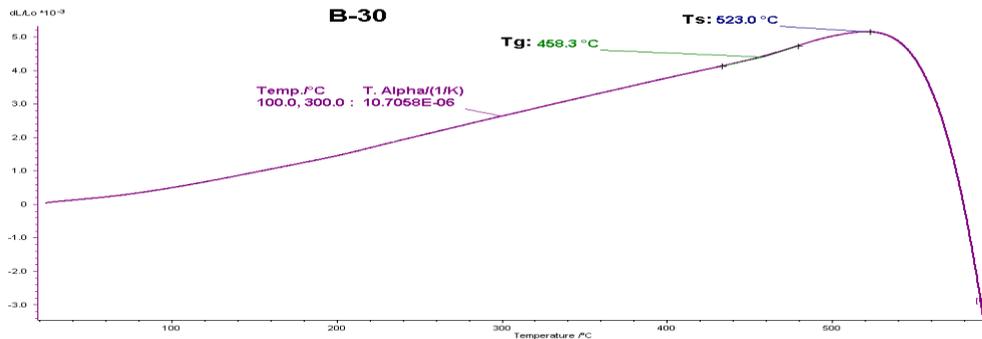
D'après la courbe de dilatation thermique du verre A50, on a trouvé les valeurs suivantes :

- Température de transition vitreuse  $T_g = 453.9^\circ\text{C}$
- Température de déformation dilatométrique  $T_s = 502.9^\circ\text{C}$
- Le coefficient de dilatation thermique dans l'intervalle [100 , 300°C] est :

$$\alpha = 13.85 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

## Echantillon B30 :

### Courbe de dilatation thermique enregistrée :



**Figure 24 :** Courbe de dilatation thermique du verre B30

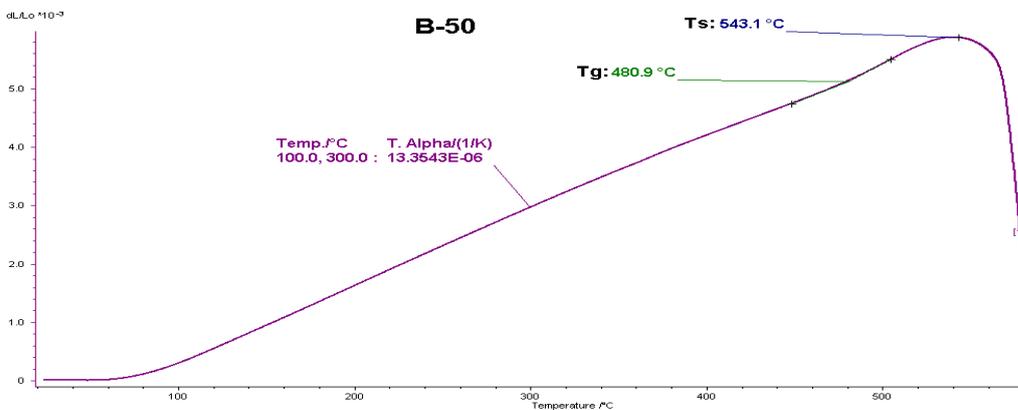
D'après la courbe de dilatation thermique du verre B30, on a trouvé les valeurs suivantes :

- Température de transition vitreuse **Tg= 458.3°C**
- Température de déformation dilatométrique **Ts= 523.0°C**
- Le coefficient de dilatation thermique dans l'intervalle [100, 300°C] est :

$$\alpha = 10.70 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

## Echantillon B 50 :

### Courbe de dilatation thermique enregistrée :



**Figure 25 :** Courbe de dilatation thermique du verre B50

## PARTIE PRATIQUE

D'après la courbe de dilatation thermique du verre B50, on a trouvé les valeurs suivantes :

- Température de transition vitreuse  $T_g = 480.9 \text{ }^\circ\text{C}$
- Température de déformation dilatométrique  $T_s = 543.1 \text{ }^\circ\text{C}$

Le coefficient de dilatation thermique dans l'intervalle  $[100, 300^\circ\text{C}]$  est :  $\alpha = 13.35 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

### Interprétation :

On remarque que les valeurs des coefficients de dilatation thermique des verres sablés augmentent par rapport les verres bruts, le sablage affecte donc la structure vitreuse, et en provoquant des défauts à l'intérieur du verre qui à leurs tours, provoquent la dilatation de ces verres, et par conséquent la résistance au choc thermique diminue.

### IV.B.8. Détermination de la transmission optique :

Pour A30, %T= 78.77

Pour A50, %T= 79.74

Pour B30, %T= 78.57

Pour B50, %T= 83.66

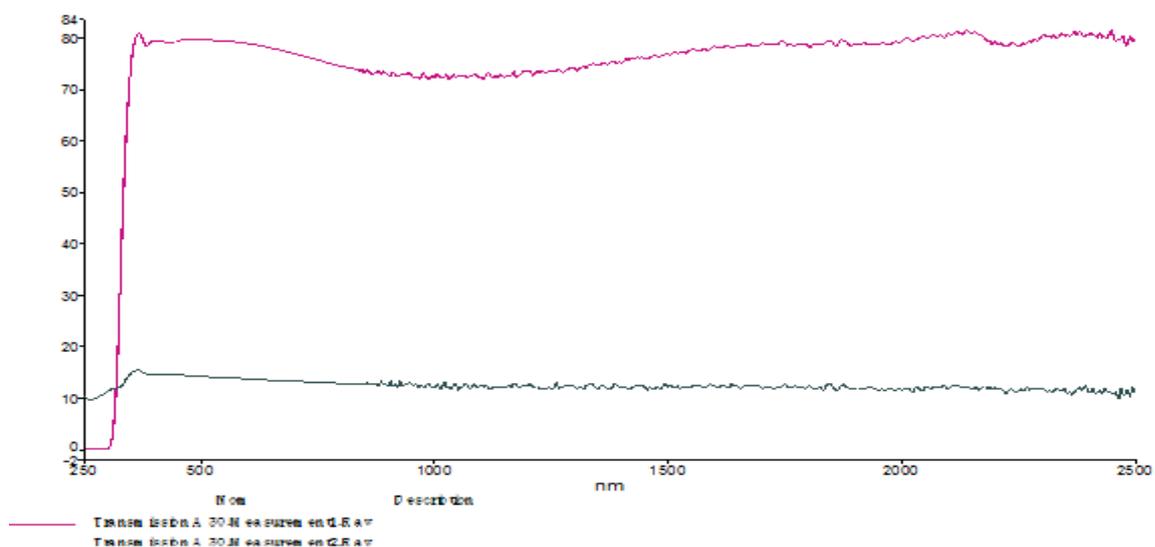


Figure 26 : Courbe de transmission optique du verre A30

# PARTIE PRATIQUE

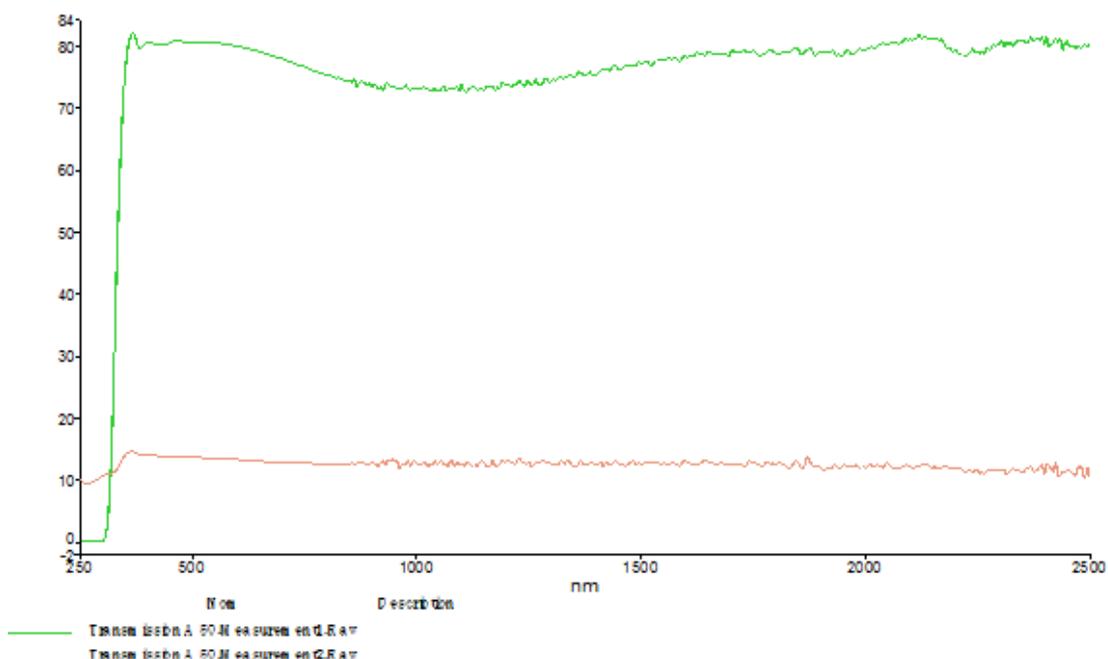


Figure 27 : Courbe de transmission optique du verre A50

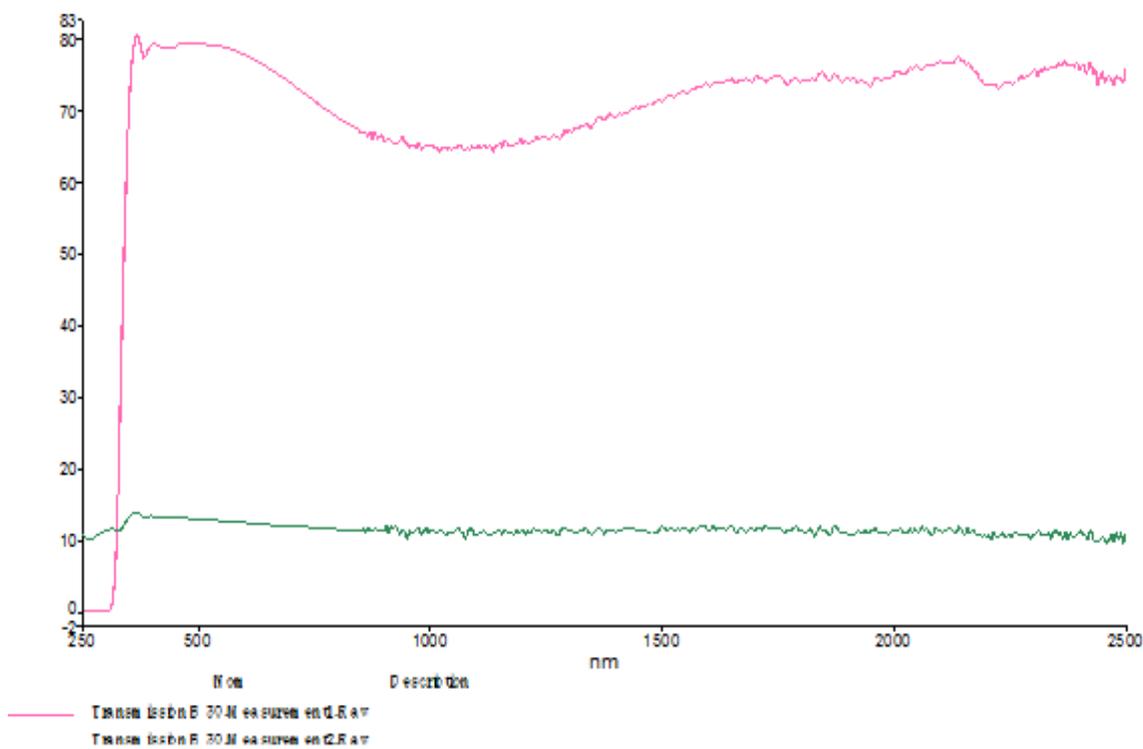


Figure 28 : Courbe de transmission optique du verre B30

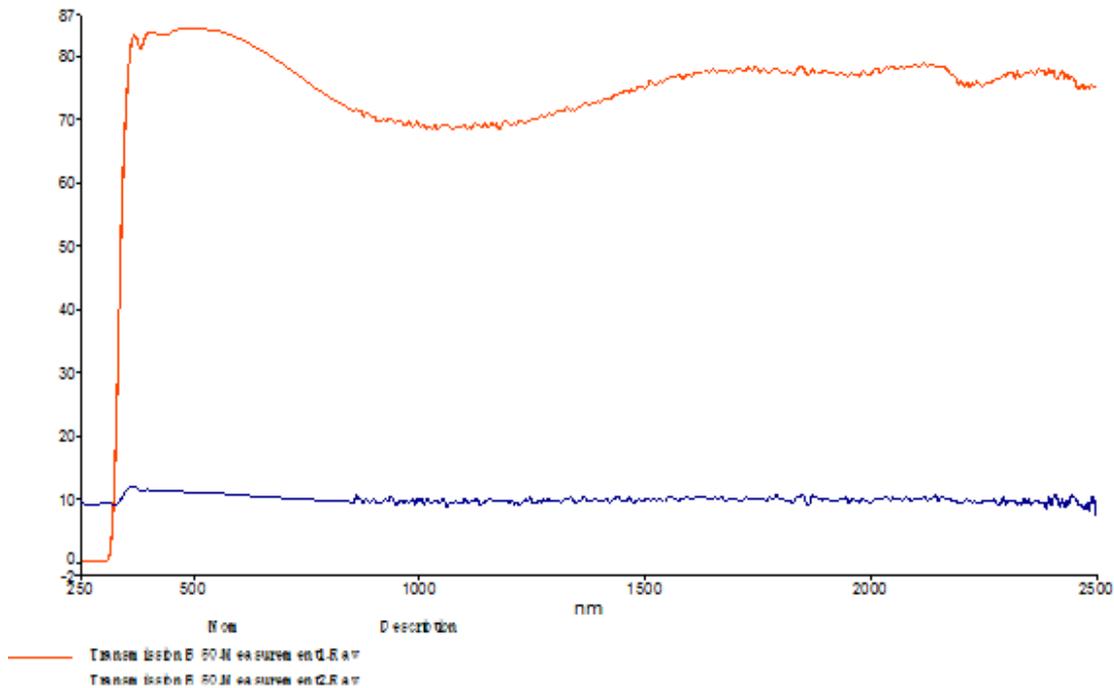


Figure 29: Courbe de transmission optique du verre B50

### Interprétation :

La valeur de transmission a chuté après sablage. Cette décroissance est liée essentiellement à la dispersion et à la réflexion de la lumière au niveau de la surface due aux défauts créés.

On remarque aussi qu'avec des distances de sablage proches (30 cm), la transmission chute, par rapport les distances de sablage à (50cm) ; car le sablage est plus intense.

### IV.B.9 Détermination de la dureté des verres :

#### Résultats

On a utilisé l'appareil Duromètre « Equotip » pour mesurer la dureté des échantillons B après sablage (la faible épaisseur des verres A rendent la mesure difficile)

Echantillon	B30	B50
Dureté Vickers (Kgf /mm <sup>2</sup> )	142	175.66

## PARTIE PRATIQUE

---

### **Interprétation :**

Les valeurs enregistrées des duretés Vickers des verres sablés sont inférieures aux celles des verres bruts. Le sablage a affecté la surface du verre et le rend moins dur par la création des défauts sur la surface des verres.

Si on compare les verres sablés d'après la distance de sablage ; on réalise que les verres sablés à une plus grande distance par rapport la buse de sablage (B50) sont plus durs que les verres sablés à une petite distance (B 30) ; donc l'impact des grains sablés à une distance proche de la source de sablage favorise plus de défauts sur la surface du verre et diminue sa dureté.

### **C° Caractérisation des échantillons sablés par le dispositif de sablage fabriqué au niveau du laboratoire (UR .MPE) :**

On a effectué l'essai de sablage par un dispositif du sablage réalisé au niveau de notre laboratoire de recherche avec une pression de 5 Bar ;

Utilisant un sable d'Ouargla.

Deux distances entre la buse de sableuse et le verre à érodé ont été choisies :

- Une distance de 30cm, verres appelés A'30 (e=3mm) et B'30 (e =3mm)
- Une distance de 50cm, verres appelés A'50 (e=5mm) et B'50 (e =5mm)

Les mêmes essais de caractérisations on été réalisés pour ces échantillons ;

On a obtenu les résultats suivants :

#### **IV.C.1 La masse volumique (hydrostatique):**

**Résultats :** On a effectué l'essai sur deux échantillons vitreux de chaque type de verre.

Pour l'échantillon (A'30), verre avec épaisseur de 3mm et la distance de sablage est de 30 cm

Echantillon A'30	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )
1	2.5009
2	2.5004

## PARTIE PRATIQUE

---

On trouve :  $M_v (A'30) = 2.5006 \text{ g/cm}^3$

Pour l'échantillon (A'50), verre avec épaisseur de 3mm et la distance de sablage est de 50 cm

Echantillon A'50	Masse volumique ( $\text{g/cm}^3$ )
1	2.4668
2	2.5015

On trouve :  $M_v (A'50) = 2.4841 \text{ g/cm}^3$

Pour l'échantillon (B'30), verre avec épaisseur de 5mm et la distance de sablage est de 30 cm

Echantillon B'30	Masse volumique ( $\text{g/cm}^3$ )
1	2.3894
2	2.5014

On trouve :  $M_v (B'30) = 2.4454 \text{ g/cm}^3$

Pour l'échantillon (B'50), verre avec épaisseur de 5mm et la distance de sablage est de 50 cm

Echantillon B'50	Masse volumique ( $\text{g/cm}^3$ )
1	2.3000
2	2.4759

On trouve :  $M_v (B'50) = 2.3879 \text{ g/cm}^3$

### Interprétation :

En comparant d'abord les verres A' et B', on remarque toujours que les verres B' sont moins denses que les verres A' à cause de leur grande épaisseur ( grand volume) ; Si on compare les verres A'30 et A'50, on remarque que  $M_v (A'30)$  est supérieure à la  $M_v (A'50)$

La même chose, si on compare les verres B'30 et B'50, on remarque que  $M_v (B'30)$  est supérieure à la  $M_v (B'50)$  ; ceci peut être expliqué par le fait d'éroder la surface du verre du plus près (30cm), ça cause une densification du verre par l'effet des particules sableuses qui se fige à l'intérieur de l'échantillon vitreux et remplit l'unité de volume beaucoup plus.

## PARTIE PRATIQUE

---

Maintenant, si on compare les masses volumiques avant et après sablage, on trouve qu'après sablage la masse volumique a augmenté, donc le sablage densifie le verre (Remplissage du vide par les particules sableuses)

### IV.C.2 La masse spécifique:

#### Résultats :

Pour l'échantillon A'30

Echantillon A'30	Valeur(g)	Masse spécifique (g/cm <sup>3</sup> )
	G= 29.7547	<b>2.6741</b>
	G1= 34.7048	
	G2= 76.2025	
	G 3= 72.8572	

Pour l'échantillon A'50

Echantillon A'50	Valeur(g)	Masse spécifique (g/cm <sup>3</sup> )
	G= 30.2486	<b>2.4386</b>
	G1= 35.1026	
	G2= 76.0900	
	G 3= 72.9600	

Pour l'échantillon B'30

Echantillon B'30	Valeur (g)	Masse spécifique (g/cm <sup>3</sup> )
	G= 29.8664	<b>2.02947</b>
	G1= 34.8065	
	G2= 75.7947	
	G 3= 72.9650	

## PARTIE PRATIQUE

Pour l'échantillon B'50

Echantillon B'50	Valeur(g)	Masse spécifique (g/cm <sup>3</sup> )
	G= 29.8662	<b>2.0135</b>
	G1= 34.8053	
	G2= 75.7984	
	G 3= 72.9859	

### Interprétation :

On remarque que les masses spécifiques après sablage sont plus grandes qu'avant sablage, En comparant entre les mêmes types de verres de mêmes épaisseurs mais à différentes distances de sablage (A'30 et A'50) ou (B30'et B'50), on trouve que plus la distance du sablage et proche, plus est grande la masse spécifique.

### IV.C.3. Détermination de l'absorption d'eau:

#### Résultats :

On a réalisé l'essai d'absorption pour un seul échantillon de chaque type de verre

Echantillon	M1 (g)	M2(g)	Ap %
A'30	6.6182	6.6184	<b>0.00302</b>
A'50	5.8501	5.8503	<b>0.00341</b>
B'30	10.1785	10.1795	<b>0.00982</b>
B'50	10.6898	10.6929	<b>0.02899</b>

### Interprétation :

Après sablage, l'absorption d'eau a diminué, ceci est expliqué par la densification des échantillons vitreux après sablage et l'insertion des particules sableuses entre les vides ce qui empêche et ralentit la diffusion des molécules d'eau.

En comparant les résultats d'absorptions des échantillons d'après la distance de sablage, on remarque que les échantillons qui sont proches de la source de sablage absorbent moins d'eau car ils sont plus denses.

## PARTIE PRATIQUE

### IV.C.4 Détermination de la résistance chimique:

-Attaque en milieu acide :

Echantillons	M0 (g)	M1 (g)	$\Delta M = \frac{M_0 - M1}{M_0} 100\%$
A'30	1.4650	1.4515	0.9215
A'50	1.2460	1.2431	0.2327
B'30	1.8177	1.8172	0.0275
B'50	2.1900	2.1890	0.0456

-Attaque en milieu basique :

Echantillons	M0 (g)	M1 (g)	$\Delta M = \frac{M_0 - M1}{M_0} 100\%$
A'30	1.1117	1.1114	0.2685
A'50	1.9139	1.9128	0.0574
B'30	3.3601	3.3595	0.0178
B'50	4.3065	4.3056	0.0208

-Attaque en milieu neutre :

Echantillons	M0 (g)	M1 (g)	$\Delta M = \frac{M_0 - M1}{M_0} 100\%$
A'30	1.2872	1.2870	0.0155
A'50	2.5148	2.5140	0.0318
B'30	3.8026	3.8021	0.0131
B'50	1.0894	1.0893	0.00776

### Interprétation des résultats :

D'abord pour l'attaque dans les trois milieux (acide, base et neutre), les échantillons A'30 et A'50 sont plus attaqués que les échantillons B'30 et B'50, et ceci à cause de leurs faibles épaisseurs d'où une diffusion rapide des solutions d'attaque dans ces verres (Voir figures correspondantes). On a remarqué que l'attaque par acide était plus forte que celle par base après sablage (les ions  $H^+$  de l'acide ont facilement entré dans les vides provoqués par le sablage et ont facilement établies les changements ioniques avec les modificateurs ( $Na_2O$ ,

## PARTIE PRATIQUE

$K_2O...$ ). (Mécanisme d'échange ionique entre des ions  $H^+$  ou  $H_3O^+$  de l'acide et les ions modificateurs de réseau)

Dans le cas de l'attaque par base, les grains de sable projetées par sablage se sont insérées à l'intérieur de la structure et ont protégé la surface du verre contre les ions  $OH^-$ , ce qui a consolidé la structure et l'attaque par base était plus faible (en la comparant avec échantillons avant sablage) ;



a: A'30



b: A'30 Acide



c: A'30 Base

**Figure 30** : L'attaque du verre A'30 dans les trois milieux :

- **a : avant attaque**
- **b : solution acide**
- **c : solution basique**
- **d : solution neutre**



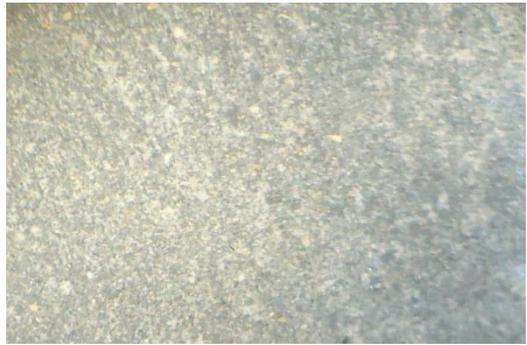
d: A'30 Eau



a: A'50



b: A'50 Acide



c: A'50 Base



d: A'50 Eau

**Figure 31:** L'attaque du verre A'50 dans les trois milieux :

- **a : avant attaque**
- **b : solution acide**
- **c : solution basique**
- **d : solution neutre**

## PARTIE PRATIQUE

---



b: B'30 Acide



a: B'30



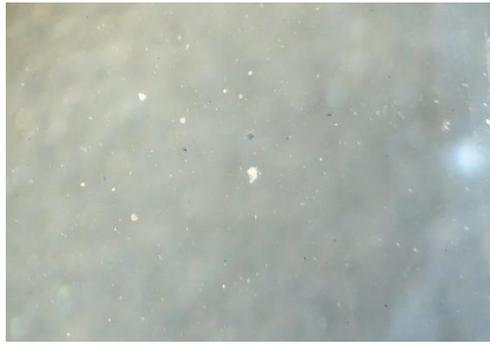
c: B'30 Base

**Figure 32** : L'attaque du verre B'30 dans les trois milieux :

- **a : avant attaque**
- **b : solution acide**
- **c : solution basique**
- **d : solution neutre**



d: B'30 Eau



b: B'50 Acide



a: B'50



c: B'50 Base

**Figure 33** : L'attaque du verre B'50 dans les trois milieux :

- **a** : avant attaque
- **b** : solution acide
- **c** : solution basique
- **d** : solution neutre



d: B'50 Eau

## PARTIE PRATIQUE

### IV.C.5. Détermination de la résistance au choc thermique :

#### Résultats :

Température T1 (°C)	Température T2 (°C)	$\Delta T$ (°C)	Observation (A'30)	Observation (A'50)	Observation (B'30)	Observation (B'50)
110	25	85	Rien	Rien	Rien	Rien
120	25	95	Rien	Rien	Fissures	Fissures
130	25	105	Fissures	Fissures	Fissures	Fissures

#### Interprétation :

Pour l'essai du choc thermique, on a réalisé l'apparition des fissures rapidement sur les verres sablés par rapport aux verres non sablés ( $\Delta T = 95^\circ\text{C}$  pour B'30 et B'50 et  $\Delta T = 105^\circ\text{C}$  pour A'30 et A'50) et les échantillons B'30 et B'50 présentent plus de fissures que les échantillons A'30 et A'50, ceci est dû à leurs grandes épaisseurs, donc ils se briseront plus rapidement. Mais si on compare la résistance thermique de ces verres par rapport aux verres sablés industriellement, on remarque que leur résistance est plus grande, ( $\Delta T = 85^\circ\text{C}$  pour B30 et B50 et  $\Delta T = 95^\circ\text{C}$  pour A30 et A50), ceci est expliqué par la grande vitesse de projection des particules sableuses par la machine industrielle (Pression 7bar), qui a provoqué plus d'érosion sur ces verres et donc a affaibli la résistance thermique.

### IV.C.6. Détermination de la résistance mécanique (Résistance à la flexion) :

#### Résultats :

#### Pour le verre A'30 :

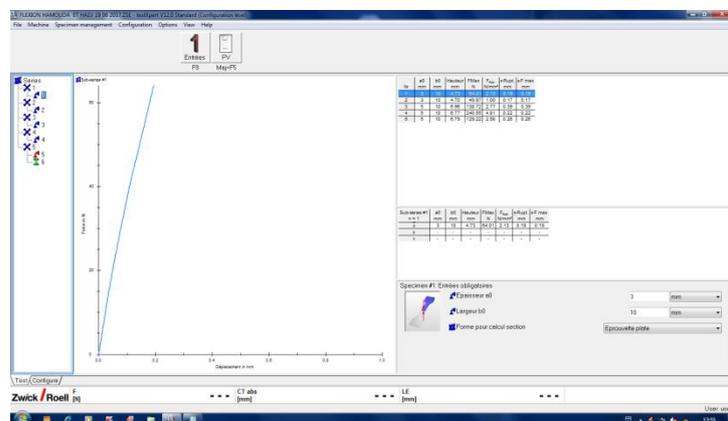


Figure 34 : Essai de flexion réalisé sur les échantillons A'30.

La force maximale de flexion appliquée est de 64.01 N pour un déplacement max de 0.19 m

# PARTIE PRATIQUE

Pour le verre A'50 :

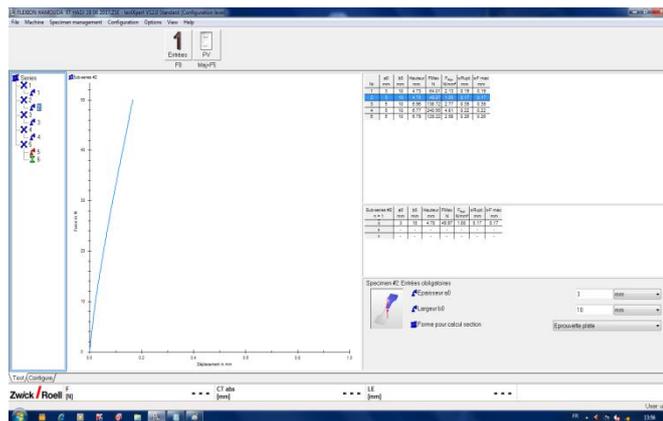


Figure 35 : Essai de flexion réalisé sur les échantillons A'50.

La force maximale de flexion appliquée est de 49.97 N pour un déplacement max de 0.17 mm

Pour le verre B'30 :

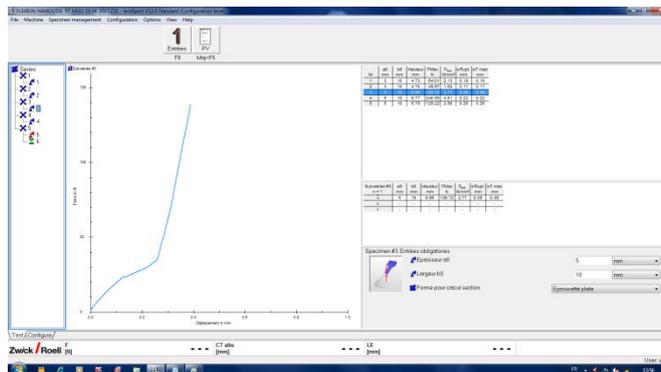


Figure 36 : Essai de flexion réalisé sur les échantillons B'30.

La force maximale de flexion appliquée est de 138.72 N pour un déplacement max de 0.39

# PARTIE PRATIQUE

Pour le verre B'50 :

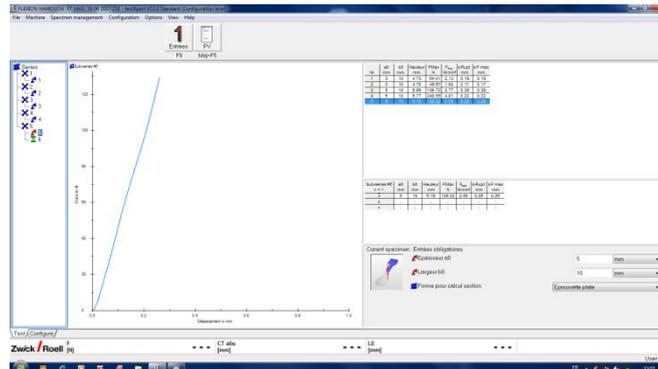


Figure 37 : Essai de flexion réalisé sur les échantillons B'50.

La force maximale de flexion appliquée est de 129.22 N pour un déplacement max de 0.26 mm

## Interprétation :

On remarque qu'après sablage, les valeurs des résistances mécaniques à la flexion deviennent nettement plus faibles.

- Dans le cas du verre brut, ce sont les microfissures préexistantes qui sont la source de la valeur de la résistance. Mais après sablage ce sont les défauts créés par les particules sableuses insérés qui diminuent la résistance mécanique du verre. On comparant les valeurs de résistances trouvées d'après les épaisseurs, on trouve que les verres de 5mm résistent plus que les verres de 3mm d'épaisseur.

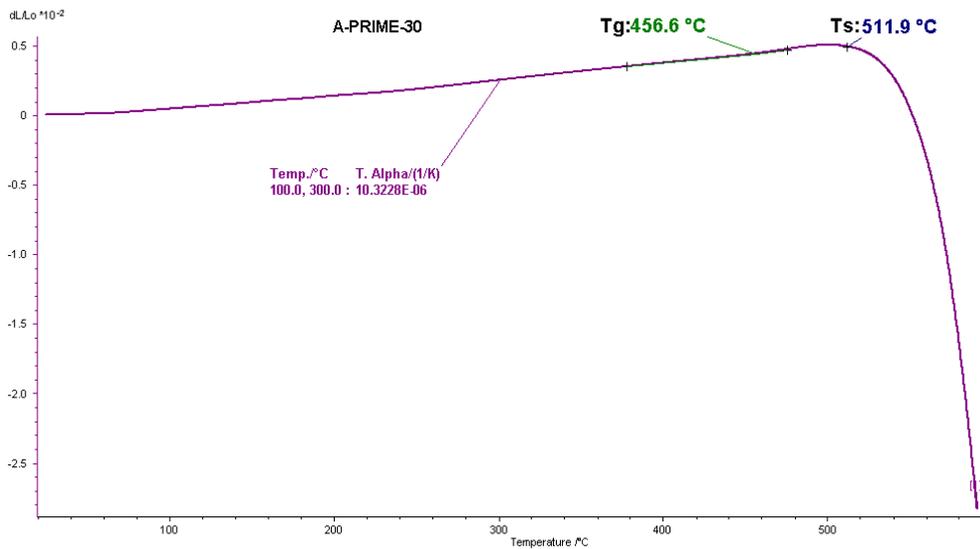
On a trouvé aussi que les résistances à la flexion sont plus grandes chez les échantillons sablés à faibles distances (30 cm) car le sablage est plus intense ce qui rend la surface comprimée plus grande et donc plus résistante, aussi ces valeurs de résistances restent plus élevées aux résistances mécaniques à la flexion des verres sablés à la sableuse industrielle ; (donc plus la vitesse de projection de sable est grande moindre est la résistance mécanique à la flexion.

## IV.C.7. Détermination de la dilatation thermique :

Résultats :

Echantillon A '30 :

Courbe de dilatation thermique enregistrée :



**Figure 38** : Courbe de dilatation thermique du verre A'30

D'après la courbe de dilatation thermique du verre A'30, on a trouvé les valeurs suivantes :

- Température de transition vitreuse **Tg=456.6 °C**
- Température de déformation dilatométrique **Ts= 511.9 °C**
- Le coefficient de dilatation thermique dans l'intervalle [100, 300°C] est :  
 **$\alpha = 10.32 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$**

## Echantillon A' 50 :

Courbe de dilatation thermique enregistrée :

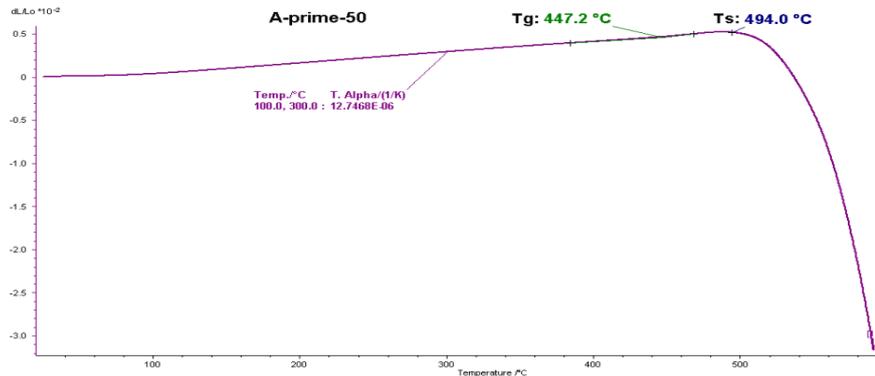


Figure 39 : Courbe de dilatation thermique du verre A'50

D'après la courbe de dilatation thermique du verre A'50, on a trouvé les valeurs suivantes :

- Température de transition vitreuse  $T_g = 447.2^\circ\text{C}$
- Température de déformation dilatométrique  $T_s = 494.0^\circ\text{C}$
- Le coefficient de dilatation thermique dans l'intervalle [100, 300°C] est :

$$\alpha = 12.7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

## Echantillon B'30 :

Courbe de dilatation thermique enregistrée :

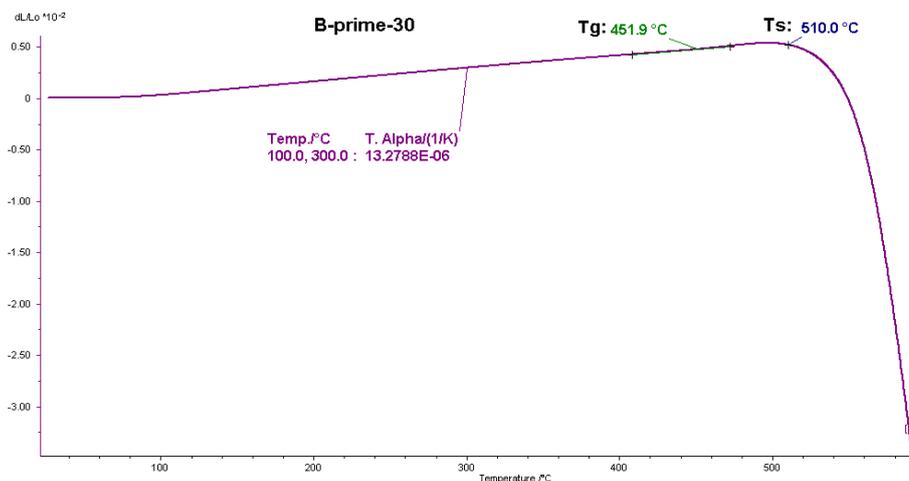


Figure 40: Courbe de dilatation thermique du verre B'30

## PARTIE PRATIQUE

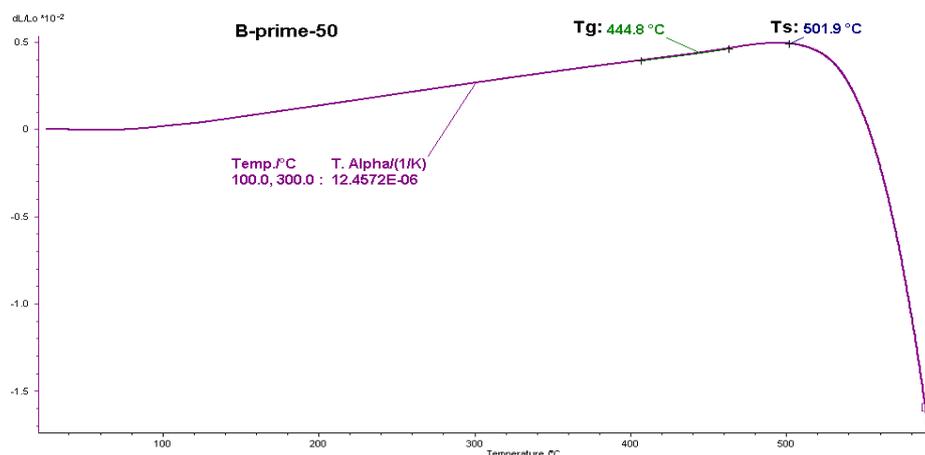
D'après la courbe de dilatation thermique du verre B'30, on a trouvé les valeurs suivantes :

- Température de transition vitreuse  $T_g = 451.9^\circ\text{C}$
- Température de déformation dilatométrique  $T_s = 510.0^\circ\text{C}$
- Le coefficient de dilatation thermique dans l'intervalle  $[100, 300^\circ\text{C}]$  est :

$$\alpha = 13.27 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

**Echantillon B'50 :**

**Courbe de dilatation thermique enregistrée :**



**Figure 41:** Courbe de dilatation thermique du verre B'50

D'après la courbe de dilatation thermique du verre B'50, on a trouvé les valeurs suivantes :

- Température de transition vitreuse  $T_g = 444.8^\circ\text{C}$
- Température de déformation dilatométrique  $T_s = 501.9^\circ\text{C}$

Le coefficient de dilatation thermique dans l'intervalle  $[100, 300^\circ\text{C}]$  est :

$$\alpha = 12.457 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

**Interprétation :**

On remarque que les valeurs des coefficients de dilatation thermique des verres sablés sont plus grandes par rapport aux verres bruts, le sablage affecte donc la structure vitreuse, et en provoquant des défauts à l'intérieur du verre qui provoquent à leur tour la dilatation de ces verres, et par conséquent la résistance au choc thermique diminue.

Les verres B'30 et B'50 se dilatent plus que les verres A'30 et A'50 et donc résistent moins au choc thermique à cause de leur plus grande épaisseur

## PARTIE PRATIQUE

### IV.C.8. Détermination de la transmission optique :

Pour A'30, %T= 75.92

Pour A'50, %T= 79.92

Pour B'30, %T= 83.13

Pour B'50, %T= 70.59

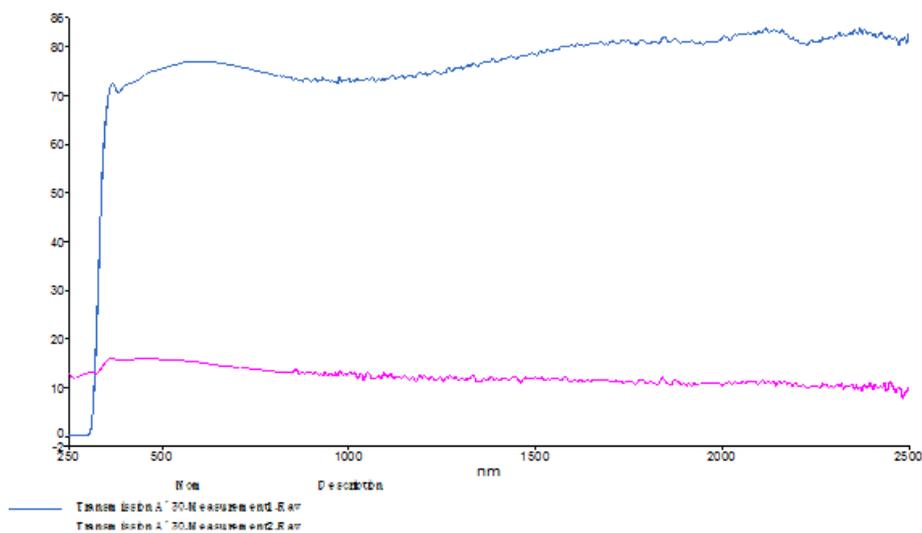


Figure 42 : courbe de transmission optique du verre

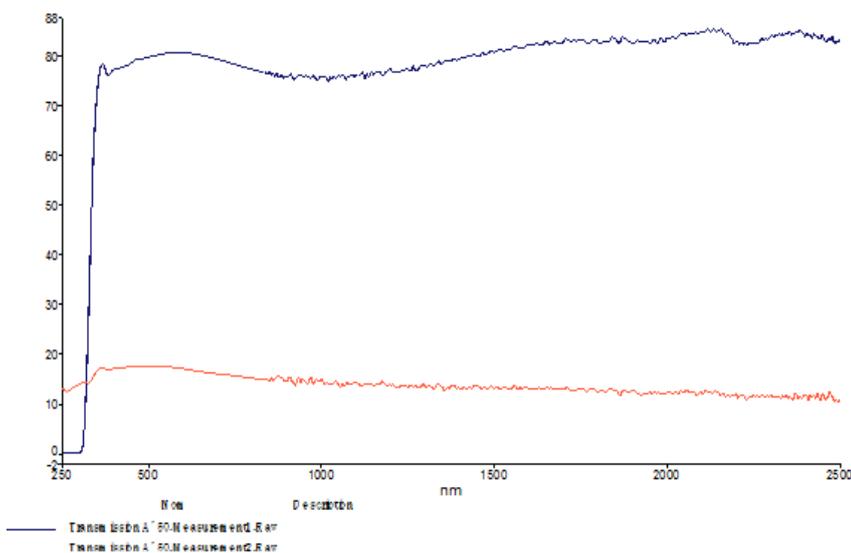
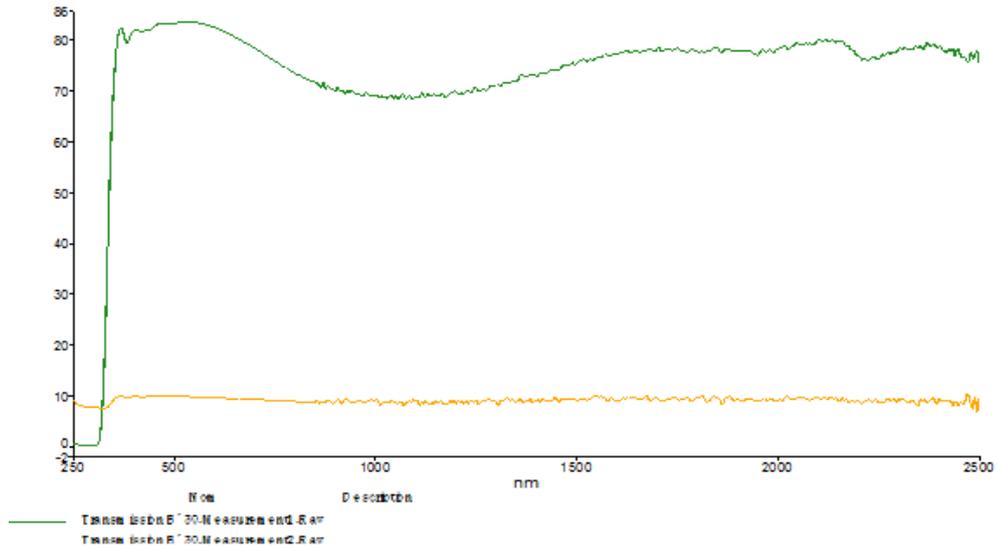
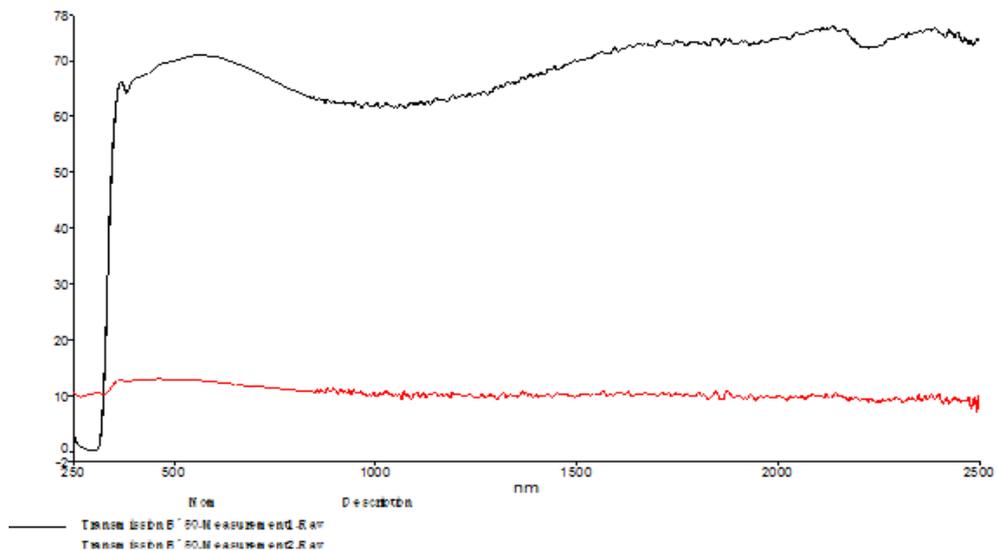


Figure 43 : courbe de transmission optique du verre

## PARTIE PRATIQUE



**Figure 44 :** courbe de transmission optique du verre



**Figure 45 :** courbe de transmission optique du verre

### Interprétation :

Après sablage, la transmission de lumière diminue ; à cause des défauts créés par sablage du verre.

## CONCLUSION GENERALE

---

### **Conclusion générale et recommandations :**

Le comportement du verre n'a pas cessé d'intriguer les chercheurs par ses propriétés spécifiques. Il est surtout apprécié pour ses caractéristiques optiques, sa résistance mécanique et sa bonne inertie chimique. Cependant dans certaines applications, son usage est très limité par son importante fragilité, due principalement à l'absence de plasticité. Celle-ci empêche tout réarrangement moléculaire pouvant réduire les concentrations de contraintes au niveau des défauts de surface. La rupture apparaît de façon brusque sans trace de plasticité apparente.

L'érosion est un phénomène mécanique connu par son usure qui se caractérise par l'enlèvement de matière suite aux impacts entre les projectiles solides et la surface d'une cible donnée. Il constitue un problème majeur par son caractère destructif dans le cas, par exemple, des véhicules circulant dans le sud Saharien et exposés à l'action des vents de sable. Leurs pare-brise s'endommagent et réduisent ainsi la visibilité des conducteurs suite à une forte diffusion de la lumière incidente. En revanche, le sablage présente dans d'autres cas un rôle bénéfique dans la décoration des verres par exemple.

D'après les travaux effectués, on a caractérisé des verres Float glass avant et après sablage, l'interprétation des résultats est basée sur quatre paramètres ;

- caractérisation des propriétés avant et après sablage
- caractérisation des propriétés selon les deux épaisseurs (3 et 5mm)
- caractérisation des propriétés selon la distance du sablage (30 et 50 cm)
- caractérisation des propriétés selon la pression ou type de sablage (5 et 7bar)

### **1. Masse volumiques (et masses spécifiques):**

- Le sablage augmente la masse volumique du verre (densification par remplissage des vides probablement par les particules sableuses fines ou débris de verre brisés)
- Les verres de faibles épaisseurs sont plus denses que les verres à grandes épaisseurs (faible volume)

## CONCLUSION GENERALE

---

-Les verres sablés à des distances proches (30cm) sont plus denses que les verres sablés à grandes distances (50cm) (l'érosion étant plus intense à 30cm provoque une plus grande densification)

### **2. Absorption :**

- Le sablage diminue l'absorption d'eau, à cause de la densification qui ralentit la diffusion des molécules d'eau.

- Les verres de faibles épaisseurs absorbent plus d'eau que les verres à grandes épaisseurs (diffusion rapide de l'eau)

- Les verres sablés à 50cm ont une absorbance d'eau plus grande que ceux sablés à 30cm (plus de vides qui laissent passer les molécules d'eau)

### **3. Résistance chimique :**

- Le sablage influe sur la résistance chimique des verres, on a remarqué qu'après sablage le mécanisme d'attaque des échantillons vitreux dans les différentes solutions chimiques a changé ; Avant sablage , l'attaque par base était plus forte que l'attaque par acide, mais après le sablage c'était le contraire, l'attaque par acide était plus grande, les ions  $H^+$  de la solution acide (faible taille) ont facilement entré dans les vides créés par sablage et ont échangé leurs positions avec les ions modificateurs du réseau ( $Na_2O$  ou  $K_2O...$ ) , par contre la couche sablée a protégé le verre contre l'attaque par les ions  $OH^-$  (plus grands) et a diminué la tendance à la destruction du réseau de silice dans le verre.

### **4. La résistance au choc thermique :**

- Après sablage, la résistance au choc thermique a nettement diminué, les défauts de sablage ont augmenté la dilatation du verre.

-Les verres avec faibles épaisseurs résistent mieux qu'aux verres à grandes épaisseur, car plus l'épaisseur est grande, plus est la différence de température entre la surface et le cœur du verre et donc le verre se brisera facilement.

## CONCLUSION GENERALE

---

- Les verres sablés avec le sablage industriel (7bar), ont une résistance thermique plus faible que les verres sablés avec le dispositif du sablage (5bar), donc plus la pression de sablage est grande, moindre est la résistance thermique.

### **5. La dilatation thermique :**

- Après sablage, la dilatation des verres augmente à cause des défauts de sablage.
- Généralement, les verres avec faibles épaisseurs se dilatent moins qu'aux verres à grandes épaisseurs.
- D'après la distance de sablage, les verres sablés à 30cm, présentent des coefficients de dilatations thermiques plus faibles qu'aux verres sablés à 50cm ; un sablage intensif de près densifie le verre et diminue sa dilatation.

### **6. Résistance mécanique à la flexion :**

- Après sablage, les résistances mécaniques chutent à cause des défauts de sablage qui dépassent généralement 30µm de taille par rapport aux verres bruts (préexistence de microfissures)
- Plus l'épaisseur du verre est grande, plus est grande la résistance mécanique à la flexion qui est due à l'augmentation de la section sollicitée.
- D'après la distance de sablage ; les verres sablés à une distance proche (30cm), sont plus résistants que les verres sablés à (50cm), car l'intensité du sablage est plus grande, et la surface sablé sollicitée est plus grande.
- Les verres sablés industriellement avec pression 7bar, présentent une plus faible résistance à la flexion que les verres sablés avec le dispositif du laboratoire (pression de 5 bar) , car une grande pression augmente l'érosion de la surface et de ce fait affaiblie la résistance mécanique.

### **7. Transmission optique :**

- Après sablage, la transmission optique diminue à cause des défauts créés par sablage qui influent sur la dispersion et la réflexion des rayons lumineux.

## CONCLUSION GENERALE

---

- La transmission est plus grande quand l'épaisseur du verre est plus faible.
- Une faible distance de sablage (sablage intense) favorise une chute de la transmission.

### 8. Dureté :

- Après sablage, la dureté des verres diminue à cause des défauts produits sur la surface du verre.

- Plus l'épaisseur du verre est grande, plus est la dureté du verre.

- Les verres sablés à 30 cm de distance, sont moins durs que les verres sablés à 50cm, car les premiers sont fortement érodés.

On peut dire donc que l'érosion du verre par sablage, influe énormément sur les propriétés des verres, certaines particules sableuses peuvent s'intégrer à l'intérieur de la surface érodée, aussi les défauts créés peuvent influencer sur la diminution de la résistance mécanique, la dureté, la résistance thermique et la transmission (nuire la visibilité). Donc pour le bon choix des verres de par brises, il faut avoir de faibles épaisseurs (3mm) et de réaliser des verres trempés pour augmenter les résistances mécaniques et thermiques ainsi que les duretés.

### Recommandation :

On pourra par la suite, étudier les paramètres qui influent sur l'érosion du verre, tel que, les variations des masses des particules projetés, variation du sable utilisé, variation des vitesses de projection, variation de l'angle de projection ...

## **Bibliographie :**

[ 1] BENTERKI SMAIL ;Thèse doctorat « Etude de la diffusion par réflexion de la lumière par un pare brise d'automobile érodé par sablage », 2015

[2] <http://www.verreonline.fr>

[3] ZARZICKI. R. : Le verre et l'état vitreux. Edition Masson 1982.

[4] SHELBY, J.E. Introduction to glass science and technology. 1997. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.

[5] SCHOLZE, H. Glass: Nature, structure and properties. 1990. Springer Verlag , New York.

[6] VARSHNEYA, A.K. Fundamentals of inorganic glasses. 1994. Academic Press, Harcourt Brace & Co. Pub.,USA.

[7] Nassir BICHARI : RENFORCEMENT MECANIQUE D'UN VERRE SODO-CALCIQUE PAR TREMPE THERMIQUE .Mémoire de Magister de l'université de Boumerdes 2007.

[8] Livre : James Barton et Claude Guille . LE VERRE SCIENCE ET TECHNOLOGIE

[9] Livre : Guide méthodologique pour évaluation des incidences sur l'environnement. FABRICATION ET FAÇONNAGE DU VERRE PLAT, DU VERRE CREUX ET DES FIBRES DE VERRE.

[10] Kermiche. « Etude de l'effet de HF sur l'état de surface d'un verre érodé par sablage », thèse de Magister 2010.

[11] Aboutaleb. « Etude de la séparation des phases dans les verres borates et borosilicates », thèse de doctorat .2010.