

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بو عريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Génie mécanique

## MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

**En : Génie mécanique**

**Spécialité : Génie Des Matériaux**

Par :

- Zebiri sami
- Zaamouche choukri

## Sujet

**Etude de la rupture de verre production national**

Soutenu publiquement, le /07/2023 , devant le jury composé de :

Dr.RAOUACHELhadj  
Dr.dairi walid  
Dr.BENTOUMI Mohammed

MCA  
MRA  
MCA

Président  
Encadreur  
Cou-encadreur

Univ-BBA  
CDTA  
Univ-BBA

Année Universitaire 2022/2023

# R

## emerciements

---

Avant tous, nous remercions Allah le tout puissant pour nous avoir donné la force et la patience pour mener à terminer ce travail.

Nous exprimons toutes nos profondes reconnaissances à notre encadreur monsieur, bentoumi Mohammed et dairi Walid qui nous a témoigné de sa confiance et de son aide scientifique et qui par son expérience et sa compétence

Nous tenons à remercier nos familles pour leurs sacrifices et leur patience avec nous surtout dans ces circonstances difficiles,

Nous tenons à remercier également l'ensemble des enseignants de département science technologie

Pour leurs rôles importants dans notre formation. En particulier les membres de jury qui ont accepté à juger notre travail.

En fin, tous nos amis qui ont contribuent de près ou de loin pour achever ce modeste travail.

Je m'incline devant dieu tout-puissant qui a ouvert la porte de la connaissance et M'a aidé à la franchir.

# Dédicaces

---

Je tiens à dédier ce travail aux personnes les plus chères à mon cœur sans exceptionnelle. Mon père et ma mère car c'est grâce à leurs soutiens que j'ai pu arriver à ce stade ; je souhaite que ce travail soit à la hauteur de tout ce qu'ils ont pu faire pour moi.

## Chapitre 1.....

Figure 1.1 : Verre sodo-clacique pour les verres d'eau .....	15
Figure I.2 : Verre pour la température élevée .....	:16
Figure 1.3 : Verre trompée pour la salle de bain .....	16
Figure 1.4 : la composition de verre lamine .....	17
Figure 1.5 : lunette (verre optique) .....	17
Figure 1.6 : verre antireflet pour les appareils électroniques .....	18
Figure 1.7 : composition d'une fenêtre à travers un verre émissive .....	18
Figure 1.8: verre autonettoyant pour les gratte-ciel .....	19
Figure 1.9 : type de verre coloré .....	19
Figure 1.10 : verre pour objectif d'appareille photo .....	20
Figure 1.11: Courbes d'évolution contrainte-déformation pour le verre, l'acier et le bois .....	22

## Chapitre 2.....

Figure 2 .1 : Schéma de l'indenteur Vickers .....	28
Figure 2 .2 : Schéma de l'indenteur Knoop .....	30
Figure 2 .3 : Empreinte Berkovich pyramidale à base triangulaire.....	31
Figure 2 .4 : Schéma du contacte sphère rigide/plan ou contacte de hertz .....	32
Figure 2 .5 : Principaux indenteurs .....	33

Figure 2 .6 : Appareil de test d'indentation universel LM séries .....	34
Figure 2 .7: Microscope optique .....	34
Figure 2.8: SEM images of indents on three materials at the maximum depth of ~800 n.....	35

### **Chapitre 3.....**

Figure 3 .1 : Produits utilisés pour le nettoyage des échantillons .....	44
Figure 3 .2 : Schéma représenté une empreinte Vickers et de la fissuration.....	45
Figure 3 .3 : Duromètre de type QTAM-QNESS 30 M .....	46
Figure 3 .4 : duromètre de types QTAM6-QNESS .....	46
Figure 3 .5 : Un microscope optique intégré dans le duromètre QTAM-QNESS 30M.....	47
Figure 3 .6: Empreintes et fissures induites par indenteur Vickers avec une charge 0.5N. 1N. 2N par rapport le temps sur le verre .....	49
Figure 3 .7 : Evolution de 2C en fonction de temps s pour une charge 1N , 2N.....	49
Figure 3 .8: Variation de la dureté du verre en fonction de les charge 0,5N. 1N. 2N par rapport temps .....	50
Figure 3 .9 : Evolution de la ténacité pour une charge 0,5N. 1N. 2N en fonction de temps s.....	51

## Chapitre 3 .....

Tableau3.1 : La composition chimique du verre est fournie par le fournisseur .....42

Tableau3.2 : propriétés physiques du verre utilisé .....43

Tableau 3.3 : l'observation microscopique du verre .....51

## Chapitre 1.....

1.1 Introduction .....	14
1.2 Définition du verre .....	14
1.3 Différents types de verre et leurs applications.....	15
1.3.1 Verre sodocalcique .....	15
1.3.2 Verre borosilicaté .....	16
1.3.3 Verre trempé .....	16
1.3.4 Verre laminé .....	17
1.3.5 Verre optique .....	17
1.3.6 Verre antireflet (verre AR) .....	18
1.3.7 Verre à faible émissivité (verre Low-E) .....	18
1.3.8 Verre autonettoyant .....	18
1.3.9 Verre coloré .....	19
1.3.10 Verre optique à faible dispersion chromatiques .....	19
1.3 Propriétés du verre .....	20
1.3.1 Propriétés physiques .....	20
1.3.2 Propriétés mécaniques .....	20
1.3.3 Propriétés thermiques .....	23
1.3.4 Propriété optique .....	23

## Chapitre 2

2.1 INTRODUCTION .....	26
2.2 Fondements de l'Indentation du Verre .....	26
2.3 Comprendre les Principes de l'Indentation du verre .....	27
2.4 Types d'Indentation et Focus sur l'Indentation Vickers .....	28
2.4.1 Indentation Vickers .....	28
2.5 Méthodes et Techniques d'Indentation du Verre .....	29
2.5.1 Indentation Vickers .....	29
2.5.2 Indentation Knoop .....	30
2.5.3 Indentation Rockwell .....	30
2.5.4 Micro-indentation .....	31
2.6 Essais d'indentation multiple .....	32
2.6.1 Mesures de résistance aux rayures .....	32
2.6.2 Modélisation et simulation .....	33
2.7 Équipement et Outils Utilisés dans l'Indentation du Verre .....	33
2.7.1 Indenteur .....	33
2.7.2 Machine d'indentation .....	34
2.7.3 Microscope optique .....	34
2.8 Système de mesure de la diagonale .....	35
2.9 Système de charge .....	35
2.10 Support d'échantillon .....	35
2.11 Logiciel d'analyse des données .....	35
2.12 Équipement de sécurité .....	36
2.13 Étapes Précises pour Réaliser un Test d'Indentation .....	36
2.14 Mesure de la Dureté du Verre par Indentation .....	38



2.14.1	Mesure de la Dureté du Verre par Indentation Vickers .....	38
2.14.2	Mesure de la Dureté du Verre par Indentation Knoop .....	39
<b>Chapitre 3</b>	.....	
3.	Matériaux et procédures expérimentales .....	42
3.1	Introduction .....	42
3.2	But Du Travail .....	42
3.3	Caractéristiques usuelles à la température ambiante .....	43
3.4	Equipements et procédés utilisés .....	43
3.4.1	Le nettoyage .....	43
3.4.2	Dispositif expérimental .....	47
3.4.3	Formules utilisés .....	47
3.5	Résultat et discussion .....	48
3.5.1	Caractérisation mécanique .....	48
3.5	Observations microscopiques .....	51

# Introduction

---

L'évolution scientifique des matériaux dans le monde est développée jour par jour, mais il est limité par rapport aux autres matériaux, à cause de son domaine d'utilisation et la méthode de la réalisation nous allons découvrir un matériau pour notre travail. Les céramiques transparentes représentent un grand tonnage de production dans les différents secteurs, il est utilisé dans les domaines de recherche industrielle, de médecine, de l'aéronautique et de la construction, etc. Les céramiques transparentes sont divisées en trois grandes familles, (monocristallins, poly cristallins et le verre amorphe). Les monocristallins et les poly cristallins sont très chères pour réaliser et difficiles à contrôler, par rapport au verre amorphe. Dans ce travail nous avons choisi le verre pour réaliser nos échantillons à cause d'une large utilisation dans tous les domaines.

Le verre isolant s'impose comme une solution pour une consommation d'énergie économique dans les bâtiments et nos maisons ; Aussi, l'isolation phonique assure une sérénité totale, ce qui ouvre la voie à son utilisation sécuritaire dans les bâtiments privés tels que les hôpitaux, les écoles, etc. Avec tous ses atouts et bénéfiques pour le monde de la construction, le verre reste un matériau indifférencié dans notre pays à savoir : verre céramique, verre feuilleté, verre brisé, etc... Cependant, son utilisation ici s'avère de plus en plus nécessaire, aujourd'hui et au futur car le monde connaîtra de nombreux développements.

Dans ce travail nous avons choisi le verre de l'entreprise CIVITAL afin de fabriquer le verre feuilleté et le verre brisé pour une variété d'utilisation.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres.

Le premier chapitre présente des généralités sur les céramiques transparentes et les verres, en particuliers les matériaux fragiles à base d'oxyde. Nous distinguons quelques notions historiques, définitions, structures et toutes leurs propriétés de ce matériau. Le deuxième chapitre est consacré à une description du verre feuilleté et verre brisé reconnu par sa résistance mécanique élevée. Nous présentons quelques notions historiques, définitions, principe de fonctionnement, structures, leurs caractéristiques et les différents vitrages de ce matériau. Le troisième chapitre repose sur l'aspect expérimental, nous décrivons le matériau et les moyens utilisés, de plus, les méthodes de préparation et la caractérisation de ce dernier. Ensuite nous présentons des résultats obtenus et leurs discussions pour les différentes caractérisations des échantillons étudiés.

Et on termine par une conclusion générale.

# Chapitre 1

---

Généralités de verre

---

## 1.1 Introduction

Les verres sont des matériaux fascinants et polyvalents qui ont une longue histoire remontant à plusieurs milliers d'années. Dépourvus d'une structure cristalline ordonnée, les verres sont des solides amorphes, ce qui leur confère des propriétés uniques et variées. Ils sont constitués principalement de silice (dioxyde de silicium), mais peuvent également contenir d'autres éléments tels que le sodium, le calcium, l'aluminium et bien d'autres. [1]

Historiquement, le verre a été découvert par hasard à travers des processus naturels tels que la fusion de sables siliceux lors d'incendies de forêt. Au fil du temps, les artisans ont maîtrisé l'art de la fabrication du verre en utilisant des techniques de soufflage, de coulage et d'étirage, permettant ainsi la création de formes et de produits variés. [2]

## 1.2 Définition du verre

Le verre est un matériau solide amorphe, transparent ou partiellement transparent, qui est principalement composé de silice (dioxyde de silicium) et d'autres éléments tels que le sodium, le calcium et l'aluminium. Contrairement aux matériaux cristallins qui ont une structure atomique ordonnée, le verre présente une structure moléculaire désordonnée, ce qui lui confère des propriétés uniques, notamment sa transparence optique, sa facilité de façonnage et sa grande variabilité de compositions.

Historiquement, le verre a été découverte de manière accidentelle à travers des processus naturels, mais son utilisation a été affinée et maîtrisée par l'homme depuis des millénaires. Grâce à sa malléabilité et à sa capacité à être transformé à des températures élevées, le verre est utilisé dans une vaste gamme d'applications, allant des fenêtres, bouteilles et récipients aux fibres optiques, écrans électroniques, lentilles, instruments scientifiques et bien d'autres produits industriels et artistiques.

En raison de ses propriétés spécifiques, le verre trouve des applications variées dans les secteurs de l'architecture, de l'électronique, de la santé, de l'optique, de l'emballage, et il continue d'être un matériau essentiel pour les innovations technologiques et les créations artistiques. [2]

## 1.3 Différents types de verre et leurs applications

Il existe plusieurs types courants de verre, chacun ayant des propriétés spécifiques adaptées à différentes applications. Voici une liste de quelques-uns de ces types de verre et leurs utilisations principales :

### 1.3.1 Verre sodo-calcique

C'est le type de verre le plus courant et est utilisé pour la fabrication de fenêtres, de miroirs, de bouteilles et de récipients, ainsi que dans les applications d'éclairage général.[3]



**Figure 1.1** : Image d'un verre sodo-clacique (verres d'eau.) [3]

### 1.3.2 Verre borosilicaté

Connu pour sa résistance aux températures élevées, il est utilisé pour les ustensiles de cuisine



résistant à la chaleur, les verreries de laboratoire, les ampoules et les fibres optiques[3]

**Figure 1.2** : Verre pour la température élevée [3]

### 1.3.3 Verre trempé

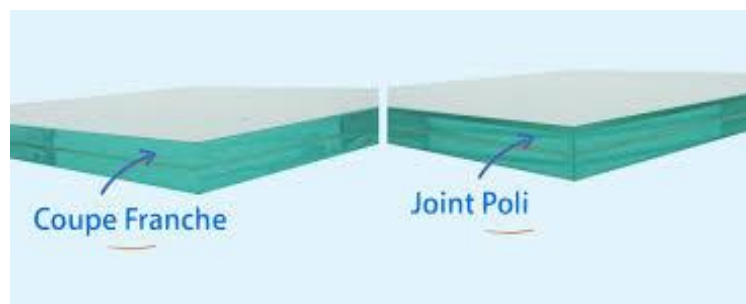
Le verre trempé est renforcé pour une meilleure résistance aux chocs. Il est utilisé dans les pare-brise automobiles, les portes de douche, les tables, les écrans de smartphones et les fenêtres exposées aux risques de bris.[4]



**Figure 1.3** : Verre trempée pour la salle de bain. [4]

### 1.3.4 Verre laminé

Le verre laminé est constitué de deux ou plusieurs couches de verre collées ensemble par un intercalaire en plastique. Il est utilisé dans les vitrages de sécurité, les pare-brise de voitures, les vitrines d'exposition et les applications où la résistance aux impacts est essentielle.[5]



**Figure 1.4** : la composition de verre lamine. [5]

### 1.3.5 Verre optique

Ce type de verre est utilisé pour les lentilles de caméras, de jumelles, de microscopes, de télescopes et d'autres instruments optiques pour ses excellentes propriétés de transmission de la lumière.[6]



**Figure 1.5** : lunette (verre optique). [6]

### 1.3.6 Verre antireflet (verre AR)

Le verre AR est utilisé dans les lentilles optiques, les écrans d'appareils électroniques, les lunettes et les vitrines pour réduire les reflets indésirables et améliorer la visibilité.[7]



Figure 1.6 : verre antireflet pour les appareils électroniques. [7]

### 1.3.7 Verre à faible émissivité (verre Low-E)

Le verre Low-E est utilisé dans les fenêtres pour améliorer l'isolation thermique, réduire les pertes de chaleur en hiver et garder l'intérieur frais en été.[8]

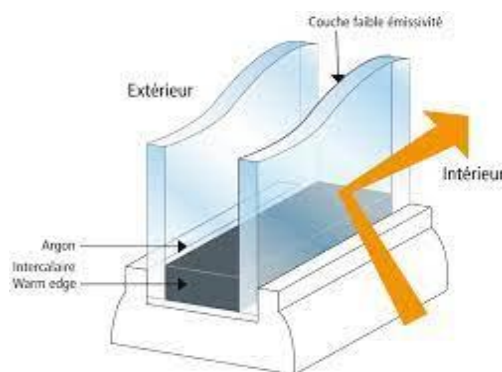


Figure 1.7 : composition d'une fenêtre à travers un verre émissive.[8]

### 1.3.8 Verre autonettoyant



Ce type de verre est enduit d'un matériau qui aide à décomposer la saleté et les particules organiques lorsqu'il est exposé à la lumière du soleil. Il est utilisé dans les fenêtres, les vitrines et les façades pour réduire la nécessité de nettoyage fréquent.[5]



**Figure1.8:** verre autonettoyant pour les gratte-ciel.[5]

### **1.3.9 Verre coloré**

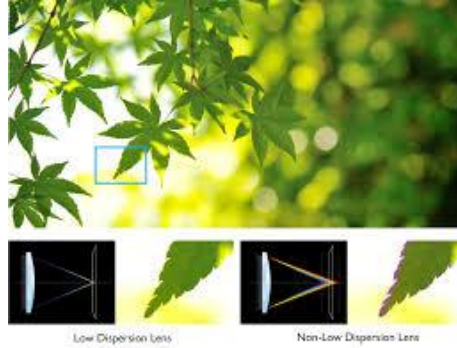
Utilisé pour des applications décoratives et artistiques, le verre coloré est utilisé dans les vitraux, les objets d'art en verre, les verres teintés de lunettes et les applications esthétiques.[3]



**Figure 1.9 :** type de verre colorée.[5]

### **1.3.10 Verre optique à faible dispersion chromatiques**

Utilisé dans les lentilles d'appareils photo et d'instruments optiques pour réduire les aberrations chromatiques, améliorant ainsi la qualité de l'image.[4]



**Figure 1.10** : verre pour objectif d'appareille photo.[7]

## 1.3 Propriétés du verre

### 1.3.1 Propriétés physiques

#### ➤ **Transparence**

Le verre est transparent à la lumière visible, ce qui signifie qu'il permet à la lumière de passer à travers lui sans déformation significative ou absorption importante. Cette propriété en fait un matériau idéal pour les fenêtres et les produits optiques.

#### ➤ **Densité**

La densité du verre est de 2,5, soit une masse de 2,5 kg/m<sup>2</sup> et par un mm d'épaisseur pour les vitrages plans. La masse volumique, exprimée dans le système d'unités légal, est de 2500 kg/m<sup>3</sup>. Un m<sup>2</sup> de verre 4 mm a donc une masse de 10 kg. [9]

#### ➤ **Point de fusion**

Le verre fond à des températures élevées, généralement autour de 1 700 degrés Celsius (3 092 degrés Fahrenheit), bien que cela puisse varier en fonction de la composition spécifique du verre.

### 1.3.2 Propriétés mécaniques

#### ➤ **Dureté**

La dureté d'un matériau est une caractéristique qui mesure sa capacité à résister à la pénétration d'un objet, tel qu'un poinçon, comme une bille en acier trempé (connue sous le nom de dureté Brinell) ou une pointe en diamant (appelée dureté Vickers). En ce qui concerne la dureté, le verre peut être divisé en deux catégories distinctes : Verres durs : Ce sont des verres caractérisés par un faible coefficient de dilatation, ce qui signifie qu'ils commencent à ramollir à des températures élevées.

- Verres tendres : Ces verres ont un coefficient de dilatation élevé, ce qui les rend susceptibles de ramollir à des températures relativement basses. [10]

### ➤ **Résistance à la compression**

La résistance à la compression du verre est exceptionnellement élevée, atteignant 1000 N/mm<sup>2</sup>, soit 1 000 MPa. Cela implique qu'il faudrait une charge d'environ 10 tonnes pour briser un cube de verre d'un centimètre de côté. [10]

### ➤ **Résistance à la flexion**

Lorsqu'un vitrage est soumis à une flexion, il présente une face en compression et une face en extension. La résistance à la rupture en flexion varie selon le type de verre :

- ✓ Pour un verre float recuit, la résistance à la rupture en flexion se situe autour de 40 MPa (N/mm<sup>2</sup>).
- ✓ Pour un verre trempé, la résistance à la rupture en flexion peut varier entre 120 et 200 MPa (N/mm<sup>2</sup>), en fonction de l'épaisseur, de la forme des bords et du type d'ouvrage.[12]
- ✓

### ➤ **Elasticité**

Un solide subit une déformation lorsqu'il est soumis à une force de déformation, et s'il retrouve sa forme initiale après la suppression de cette force, il est considéré comme élastique. La loi de Hooke établit que la déformation (D) est proportionnelle à la contrainte ( $\sigma$ ) appliquée :  $\sigma = E \cdot D$

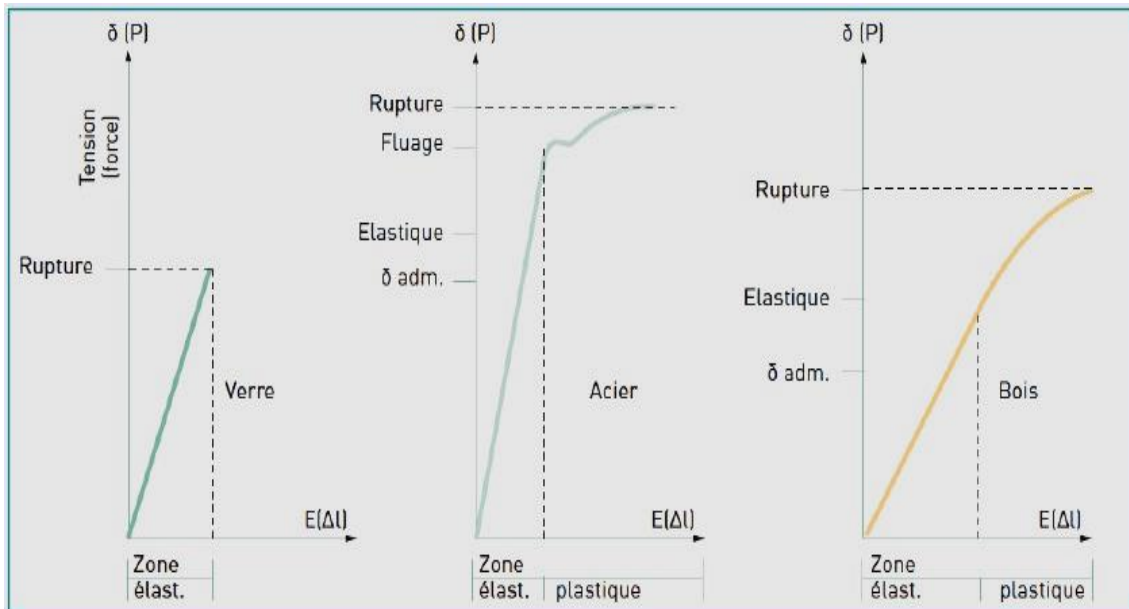
Le verre est un matériau parfaitement élastique, ce qui signifie qu'il ne subit pas de déformation permanente sous l'effet d'une force. Cependant, il présente une fragilité intrinsèque, ce qui signifie que sous une contrainte de flexion croissante, il se brise sans avertissement préalable.

Il convient de noter que le verre possède une remarquable résistance à la compression, nécessitant une pression de 10 tonnes pour briser un centimètre cube de ce matériau

La vitesse maximale de fissuration du verre (Vm) peut être déterminée par l'expression suivante, où E représente le module d'Young et  $\rho$  la masse volumique :

### ➤ **Module d'Young E**

Ce module mesure la force de traction théorique nécessaire pour étirer une éprouvette de verre à une longueur égale à sa longueur initiale, et il est exprimé en force par unité de surface. Selon les normes européennes, le module d'Young du verre est de 7 fois [27]



**Figure 1.11:** Courbes d'évolution contrainte-déformation pour le verre, l'acier et le bois. [27]

### ➤ Coefficient de poisson

Lorsqu'une éprouvette est soumise à une contrainte mécanique qui entraîne son allongement, on observe simultanément une réduction de sa section. Le coefficient de Poisson, noté  $\nu$ , quantifie le rapport entre cette réduction unitaire dans une direction perpendiculaire à la direction de la force et l'allongement unitaire dans la direction de la force. Pour les vitrages utilisés dans la construction, la valeur typique du coefficient  $\nu$  est de 0,2.[11]

## 1.3.3 Propriétés thermiques

### ➤ conductivité thermique

En comparaison avec les métaux, le verre a une faible capacité à conduire la chaleur, bien qu'elle soit supérieure à celle des matériaux d'isolation conventionnels. Cependant, dans les applications pratiques liées aux bâtiments, la conductivité thermique du verre joue un rôle relativement mineur. L'efficacité exceptionnelle des verres isolants, en particulier, repose principalement sur les propriétés isolantes conférées par des traitements spécifiques. [13]

### ➤ **dilatation thermique**

Comparé à d'autres matériaux, le verre présente une faible dilatation thermique, qui varie en fonction de sa composition. Toutefois, il est vulnérable aux brusques variations de température car ses différentes parties ne chauffent pas uniformément. Son coefficient de dilatation thermique est de  $9,0 \times 10^{-6}/K$ , ce qui signifie qu'une plaque de verre d'un mètre de longueur augmentera de 0,9 mm en cas d'élévation de la température de 100 °K. En comparaison, pour l'aluminium, cette valeur serait de 2,4 mm. [14]

### **1.3.4 Propriété optique**

Le verre se caractérise par sa grande capacité à laisser passer le rayonnement solaire. Cette caractéristique se manifeste à travers les propriétés physiques du verre, qui sont des valeurs de référence en matière de transmission de rayonnement.[15]

# Chapitre 2

---

***L'Indentation du Verre***

---

## 2.1 INTRODUCTION

Les interactions de contact se produisent fréquemment avec de nombreux matériaux pendant leur fabrication ou leur utilisation, ce qui rend l'étude de leur comportement par indentation d'une importance cruciale. En outre, l'indentation Vickers est reconnue comme une méthode permettant de caractériser la ténacité et la résistance au choc thermique des matériaux fragiles. La nano indentation offre une résolution exceptionnellement élevée, ce qui permet de mesurer le champ de contrainte résultant d'un processus de recuit de manière précise.

La technique d'indentation instrumentée est largement répandue en raison de sa simplicité et de sa capacité à fournir des informations essentielles. Elle est utilisée pour évaluer les propriétés mécaniques de surface telles que la dureté, le module d'élasticité et la résistance à la fissuration. Dans de nombreux cas, elle est employée pour étudier les revêtements appliqués sur divers types de substrats. [1]

## 2.2 Fondements de l'Indentation du Verre

L'indentation du verre fait référence au processus de création d'une empreinte ou d'une déformation superficielle dans un matériau en verre en appliquant une force contrôlée à l'aide d'un outil spécialement conçu appelé indenteur. Ce processus est couramment utilisé pour mesurer la dureté du verre et pour évaluer ses propriétés mécaniques. [2]

Les fondements de l'indentation du verre sont les suivants :

### ❖ Indenteur

L'outil utilisé pour effectuer l'indentation est généralement une pointe en diamant ou en carbure de tungstène. La forme et la taille de l'indenteur peuvent varier en fonction des besoins de l'expérience.[3]

### ❖ Charge

Une charge est appliquée à l'indenteur, généralement de manière progressive. La valeur de la charge est mesurée en newtons (N) et peut varier en fonction de l'application spécifique. La charge est appliquée de manière contrôlée jusqu'à ce qu'une déformation significative du verre soit observée.[3]

### ❖ Profondeur de l'indentation

La profondeur de l'indentation, c'est-à-dire la distance à laquelle l'indenteur pénètre dans le verre, est mesurée avec une grande précision. Cette mesure est utilisée pour calculer la dureté du verre. [4]

### ❖ Dureté

La dureté du verre est calculée en fonction de la force appliquée et de la profondeur de l'indentation. La dureté est généralement exprimée en unités de pression, telles que les pascals (Pa) ou les gigapascals (GPa).

## ❖ Loi de Hertzian

La loi de Hertzian est utilisée pour modéliser le comportement de l'indentation. Elle relie la force appliquée, la géométrie de l'indenteur et la profondeur de l'indentation, ce qui permet de calculer la dureté.[4]

## ❖ Anisotropie

Le verre peut présenter une anisotropie de dureté, ce qui signifie que sa dureté peut varier en fonction de la direction dans laquelle l'indentation est effectuée. Cette propriété est importante à prendre en compte lors de l'indentation du verre.

## ❖ Essais multiples

Pour obtenir des résultats fiables, il est courant d'effectuer plusieurs essais d'indentation à différents endroits du matériau. Cela permet de prendre en compte les variations locales de dureté. [3]

## 2.3 Comprendre les Principes de l'Indentation du verre

L'indentation du verre est une technique précieuse pour caractériser les propriétés mécaniques du verre, notamment sa dureté, sa ténacité et sa résistance aux rayures. Elle est largement utilisée dans l'industrie du verre pour garantir la qualité des produits et dans la recherche scientifique pour étudier les propriétés des matériaux en verre. [5]

L'indentation du verre est une méthode de caractérisation des propriétés mécaniques du verre en créant une déformation contrôlée dans sa surface à l'aide d'un outil pointu appelé indenteur. Cette technique est basée sur plusieurs principes fondamentaux :

- **Indenteur** : L'indenteur est généralement une pointe dure en diamant ou en carbure de tungstène qui a une forme conique ou pyramidale. Cette pointe est utilisée pour appliquer une force contrôlée à la surface du verre.[6]
- **Application de la force** : Une force est appliquée progressivement sur l'indenteur, généralement à l'aide d'un système de précision. La force est augmentée jusqu'à un niveau préétabli. [6]
- **Pénétration** : Sous l'effet de la force, l'indenteur pénètre dans la surface du verre. Ce processus peut provoquer une déformation plastique du matériau à la pointe de l'indenteur.
- **Mesure de la profondeur** : La profondeur de la pénétration de l'indenteur dans le verre est mesurée avec une grande précision à l'aide d'un microscope ou d'un capteur de déplacement. Cette mesure est cruciale pour évaluer la dureté du verre.[4]
- **Évaluation de la dureté** : La dureté du verre est calculée en fonction de la force appliquée et de la profondeur de l'indentation. Elle est généralement exprimée en unités de pression, telles que les pascals (Pa) ou les gigapascals (GPa). La relation entre la force, la profondeur et la dureté est souvent décrite par la loi de Hertzian.[5]



- **Anisotropie** : Le verre peut présenter une anisotropie de dureté, ce qui signifie que sa dureté peut varier en fonction de la direction dans laquelle l'indentation est effectuée. Il est important de prendre en compte cette variation lors de l'analyse des résultats.
- **Essais multiples** : Pour obtenir des données fiables, il est recommandé d'effectuer plusieurs essais d'indentation à différents endroits du verre. Cela permet de tenir compte des variations locales de dureté.[6]
- **Applications** : L'indentation du verre est utilisée pour caractériser diverses propriétés mécaniques du verre, notamment la dureté, la ténacité, la résistance aux rayures, et d'autres paramètres. Elle est couramment utilisée dans l'industrie du verre pour le contrôle qualité des produits et dans la recherche scientifique pour étudier les matériaux en verre.

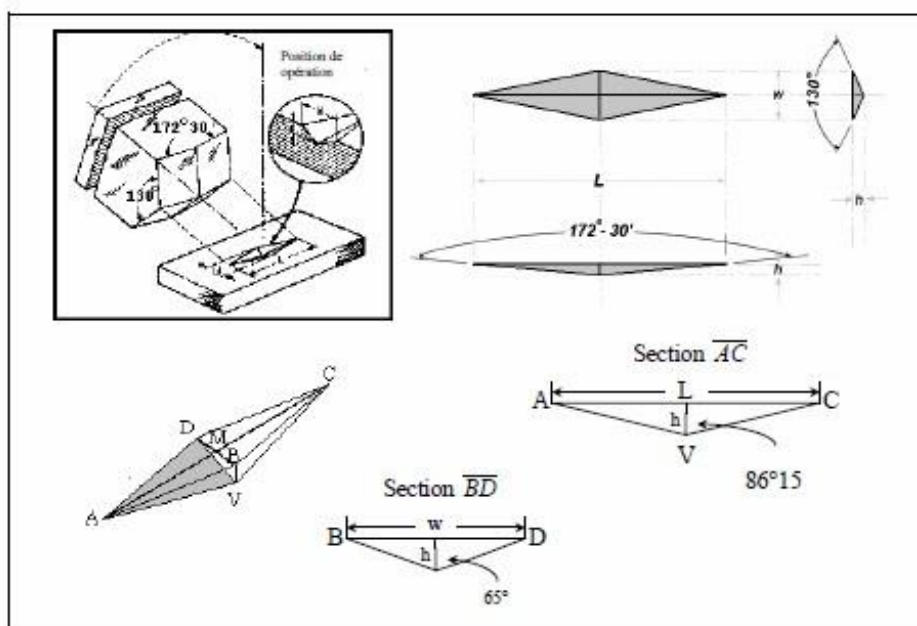
## 2.4 Types d'Indentation et Focus sur l'Indentation Vickers

Il existe plusieurs types d'indentation utilisés pour caractériser les propriétés mécaniques des matériaux, y compris le verre. Parmi les méthodes couramment utilisées, on trouve l'indentation Brinell, l'indentation Rockwell, l'indentation Knoop, et l'indentation Vickers. Focalisons-nous sur l'indentation Vickers et ses caractéristiques spécifiques :

### 2.4.1 Indentation Vickers

#### ➤ **Forme de l'indenteur**

L'indenteur Vickers a une forme de pyramide carrée à base quadrangulaire, avec un angle de pointe de 136 degrés. Il a une pointe bien définie, ce qui en fait un choix précis pour l'indentation.[7]



**Figure 2.1** : Schéma de l'indenteur Vickers [7]

### ➤ **Mesure de la diagonale**

La méthode Vickers mesure la diagonale de l'empreinte laissée dans le matériau par l'indenteur. Cela signifie que la taille de l'empreinte est mesurée en termes de diagonale (la longueur de la ligne droite entre les coins opposés de l'empreinte) plutôt qu'en profondeur.[8]

### ➤ **Calcul de la dureté**

La dureté Vickers est calculée en fonction de la charge appliquée (généralement exprimée en kilogrammes-force) et de la taille de l'empreinte (diagonale). La formule pour calculer la dureté Vickers est la suivante :  $HV = (2 * F) / (d^2)$ , où HV est la dureté Vickers, F est la force appliquée, et d est la diagonale de l'empreinte.[9]

### ➤ **Précision**

L'indentation Vickers est considérée comme l'une des méthodes les plus précises pour mesurer la dureté des matériaux. La forme bien définie de l'indenteur et la mesure de la diagonale permettent d'obtenir des résultats fiables et reproductibles.[8]

### ➤ **Applications**

L'indentation Vickers est utilisée pour caractériser la dureté de divers matériaux, y compris les métaux, les céramiques, les polymères et, bien sûr, le verre. Elle est particulièrement adaptée aux matériaux fragiles comme le verre, car elle crée une petite empreinte qui minimise les risques de dommages supplémentaires. [9]

### ➤ **Échelle de dureté**

La dureté Vickers est généralement exprimée en unités HV et n'a pas d'unités spécifiques. Elle est souvent utilisée pour comparer la dureté relative de différents matériaux.

## **2.5 Méthodes et Techniques d'Indentation du Verre**

L'indentation du verre est une méthode courante pour caractériser les propriétés mécaniques de ce matériau fragile. Voici quelques-unes des méthodes et techniques couramment utilisées pour l'indentation du verre [10]

### **2.5.1 Indentation Vickers**

#### **❖ Principe**

L'indentation Vickers utilise un indenteur en forme de pyramide carrée à base quadrangulaire pour créer une empreinte sur la surface du verre. La diagonale de l'empreinte est mesurée pour calculer la dureté Vickers.

#### ❖ Avantages

Cette méthode est précise et largement utilisée pour mesurer la dureté des matériaux, y compris le verre. [11]

### 2.5 .2 Indentation Knoop

#### ❖ Principe

L'indentation Knoop utilise un indenteur en forme de pyramide allongée avec une pointe asymétrique. La longueur de la diagonale longue de l'empreinte est mesurée pour calculer la dureté Knoop.

#### ❖ Avantages

La méthode Knoop est souvent utilisée pour mesurer la dureté des matériaux très minces ou pour détecter de petites variations locales de dureté. [10]

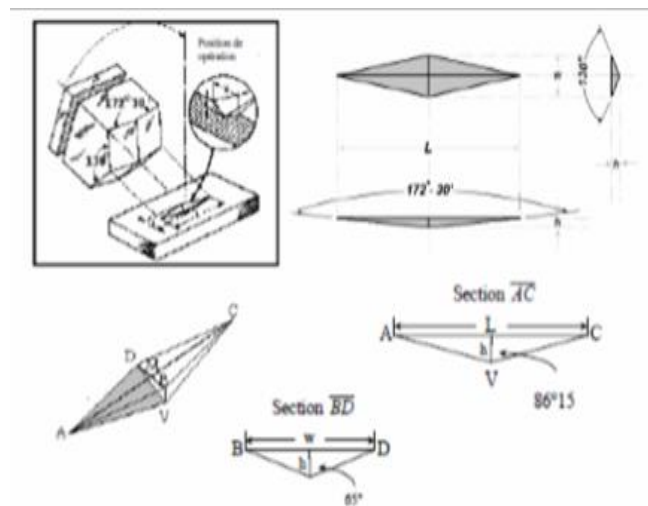


Figure 2.2 : Schéma de l'indenteur Knoop [10]

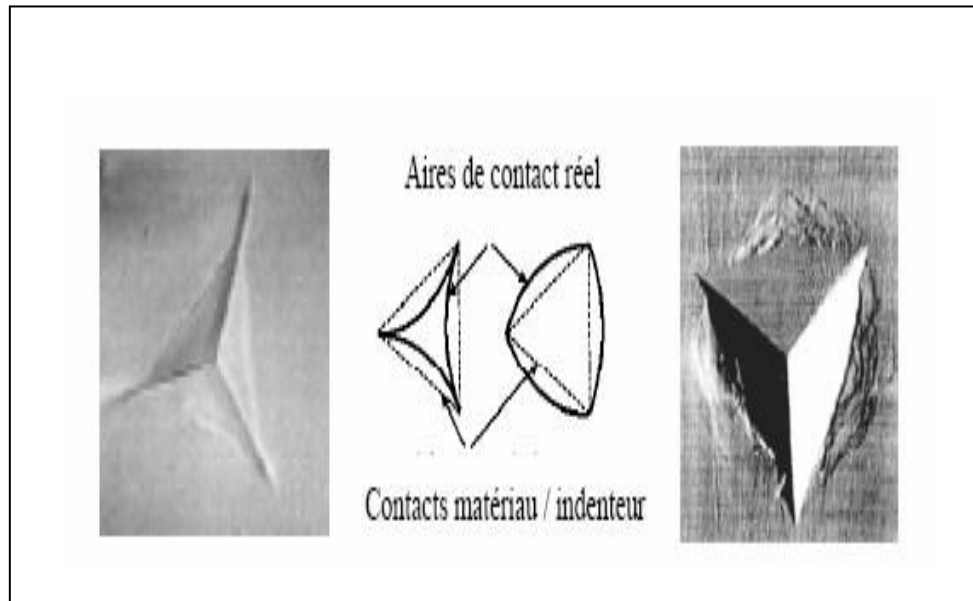
### 2.5 .3 Indentation Rockwell

#### ❖ Principe

L'indentation Rockwell mesure la profondeur de pénétration de l'indenteur dans le verre sous l'effet d'une charge préalablement définie. La dureté est calculée en fonction de cette profondeur. [12]

### ❖ Avantages

Cette méthode est simple et rapide, mais elle n'est pas aussi précise que l'indentation Vickers ou Knoop.  
[15]



**Figure 2.3** : Empreinte Berkovich pyramidale à base triangulaire [15]

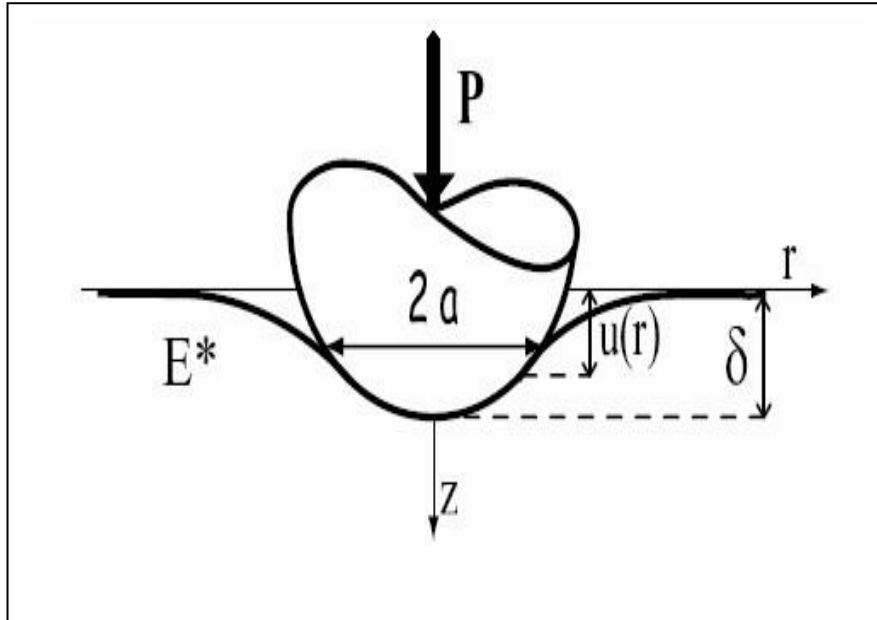
## 2.5.4 Micro-indentation

### ❖ Principe

La micro-indentation est une méthode qui utilise des charges légères et des indenteurs plus petits pour minimiser les dégâts à la surface du verre. Elle est souvent utilisée pour caractériser des couches minces de verre ou pour effectuer des tests localisés. [13]

### ❖ Avantages

Elle permet d'obtenir des informations sur la dureté locale du verre avec une résolution élevée.[13]



**Figure 2.4** : Schéma du contact sphère rigide/plan ou contacte de hertz [13]

## 2.6 Essais d'indentation multiple

### ❖ Principe

Pour obtenir des résultats représentatifs, il est courant d'effectuer plusieurs essais d'indentation à différents endroits du verre. Cela permet de tenir compte des variations locales de dureté.[14]

### ❖ Avantage

Les essais multiples aident à réduire les erreurs dues à des imperfections ou à des anomalies dans le matériau.[14]

### 2.6.1 Mesures de résistance aux rayures

#### ❖ Principe

Les tests de résistance aux rayures consistent à rayer la surface du verre avec un matériau de dureté connue, tel que le diamant. La force requise pour produire une rayure est une mesure de la résistance aux rayures du verre.[13]

#### ❖ Avantages

Ces tests évaluent la capacité du verre à résister aux égratignures, ce qui est important pour de nombreuses applications.[13]

### 2.6.2 Modélisation et simulation

#### ❖ Principe

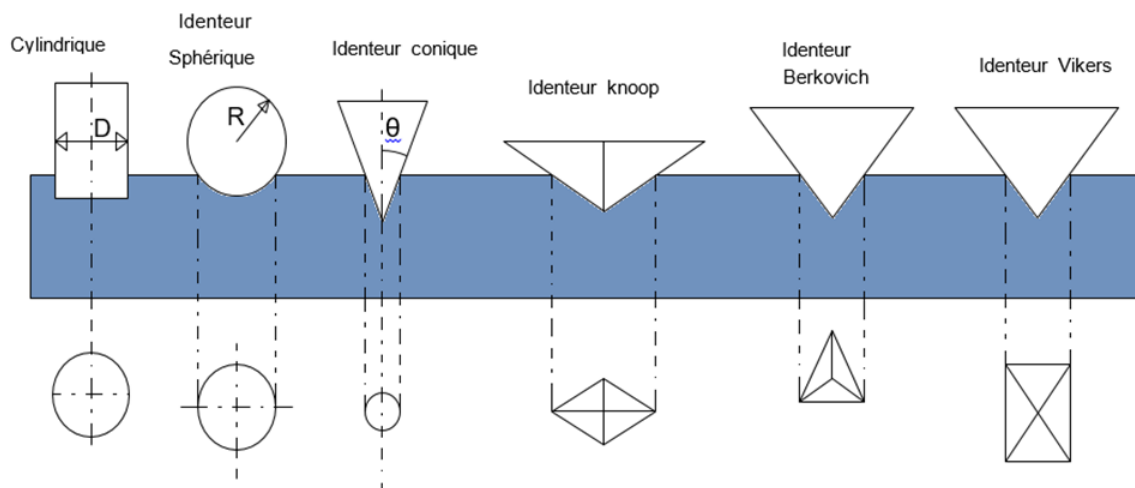
La modélisation par éléments finis est parfois utilisée pour simuler le processus d'indentation et prédire les propriétés mécaniques du verre en fonction des résultats d'essais d'indentation. L'indentation du verre est une méthode polyvalente qui peut être adaptée en fonction des besoins spécifiques de caractérisation des propriétés mécaniques du verre, qu'il s'agisse de dureté, de résistance aux rayures, de ténacité, ou d'autres paramètres. Les choix de méthode et de technique dépendront des objectifs de l'analyse et des propriétés du verre que vous souhaitez évaluer.[15]

## 2.7 Équipement et Outils Utilisés dans l'Indentation du Verre

L'indentation du verre nécessite des équipements et des outils spécifiques pour effectuer des tests de manière précise et reproductible. Voici les principaux équipements et outils utilisés dans le processus d'indentation du verre :

### 2.7.1 Indenteur

L'indenteur est l'outil pointu qui est utilisé pour créer une déformation contrôlée dans la surface du verre. Les types d'indenteurs couramment utilisés pour le verre comprennent l'indenteur Vickers (pyramide carrée), l'indenteur Knoop (pyramide allongée), et des pointes en diamant ou en carbure de tungstène. Le choix de l'indenteur dépend de la méthode d'indentation et des propriétés spécifiques à mesurer. [16]



### 2.7.2 Machine d'indentation

Une machine d'indentation est un équipement qui permet de contrôler la force appliquée à l'indenteur et de mesurer la profondeur de pénétration de l'indenteur dans le verre. Ces machines sont souvent équipées d'un système de précision pour appliquer la force de manière contrôlée et d'un système de mesure pour enregistrer la déformation. Les machines d'indentation peuvent être manuelles ou automatisées.



Figure 2.6 : Appareil de test d'indentation universel LM series [16]

### 2.7.3 Microscope optique

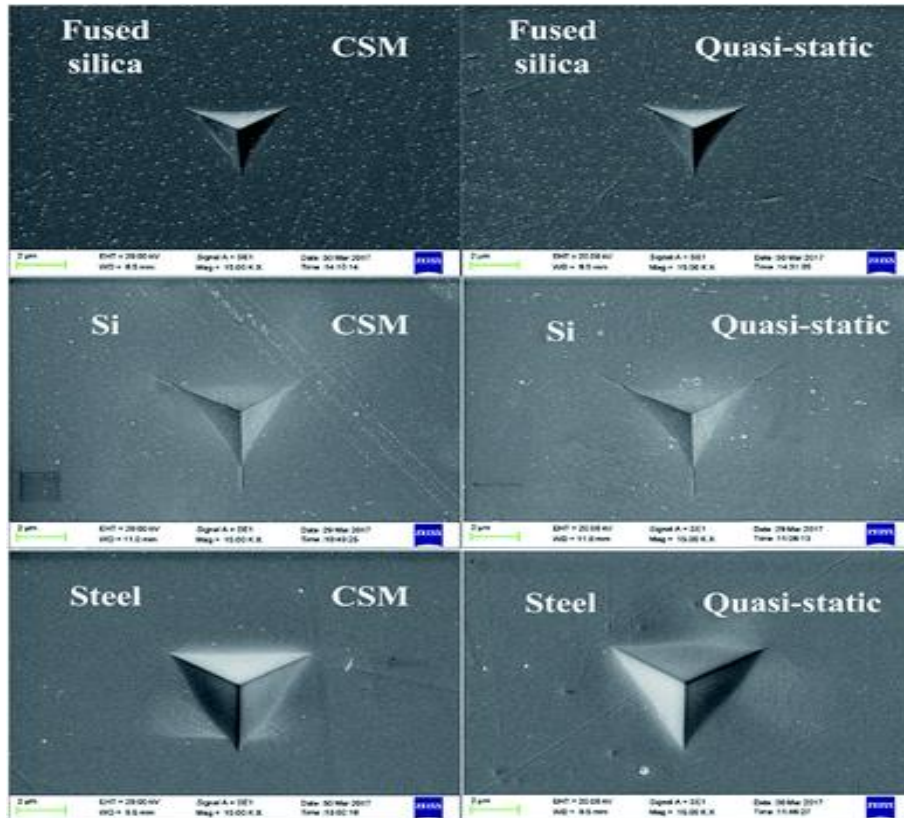
Un microscope optique est généralement utilisé pour observer l'empreinte laissée par l'indenteur sur la surface du verre. Cela permet de mesurer la diagonale de l'empreinte dans le cas de l'indentation Vickers ou Knoop, ou de visualiser la déformation du verre.



Figure 2.7 : Microscope optique [18]

## 2.8 Système de mesure de la diagonale

Pour les méthodes Vickers et Knoop, un système de mesure de la diagonale est essentiel pour mesurer avec précision la longueur de la diagonale de l'empreinte. Des caméras numériques et des logiciels d'analyse



d'images sont souvent utilisés à cette fin.

**Figure 2.8 :** SEM images of indents on three materials at the maximum depth of ~800 nm. [17]

## 2.9 Système de charge

Les machines d'indentation sont équipées de systèmes de charge pour appliquer une force contrôlée à l'indenteur. La force est généralement mesurée en unités de poids, telles que les kilogrammes-force (kgf) ou les newtons (N).

## 2.10 Support d'échantillon



Pour maintenir en place l'échantillon de verre pendant le test, un support d'échantillon est nécessaire. Il doit être conçu de manière à ne pas interférer avec le processus d'indentation.

## **2.11 Logiciel d'analyse des données**

Pour traiter les données recueillies pendant les tests d'indentation, un logiciel d'analyse des données est souvent utilisé. Il permet de calculer la dureté, de générer des graphiques et de stocker les résultats.[5]

## **2.12 Équipement de sécurité**

Comme l'indentation du verre peut produire des éclats ou des débris, il est essentiel de porter des équipements de sécurité appropriés, tels que des lunettes de protection, des gants et une blouse de laboratoire.

Ces équipements et outils sont essentiels pour réaliser des tests d'indentation du verre de manière précise et sûre. Le choix de l'équipement dépendra des méthodes spécifiques utilisées et des exigences de l'application.[5]

## **2.13 Étapes Précises pour Réaliser un Test d'Indentation**

Réaliser un test d'indentation implique plusieurs étapes précises pour obtenir des données fiables et significatives sur les propriétés mécaniques d'un matériau, tel que le verre. Voici les étapes générales à suivre pour effectuer un test d'indentation :

### **✓ Préparation de l'échantillon**

Assurez-vous que l'échantillon de verre est propre et exempt de particules ou de contaminants.

Fixez solidement l'échantillon sur un support d'échantillon approprié, en veillant à ce qu'il soit bien stabilisé.[9]

### **✓ Sélection de l'indenteur**

Choisissez l'indenteur approprié en fonction de la méthode d'indentation (par exemple, Vickers, Knoop) et des propriétés mécaniques du verre que vous souhaitez mesurer.

### **✓ Calibration de la machine d'indentation**

Calibrez la machine d'indentation en utilisant des étalons de dureté appropriés. Assurez-vous que la machine est correctement étalonnée pour garantir des résultats précis.[11]

✓ **Réglage de la charge**

Déterminez la charge à appliquer à l'indenteur. La valeur de la charge dépendra des propriétés du verre et des spécifications de l'essai. La charge peut être exprimée en kilogrammes-force (kgf) ou en newtons (N).

✓ **Positionnement de l'indenteur**

Placez soigneusement l'indenteur au-dessus de la zone de l'échantillon où vous souhaitez effectuer l'indentation.

✓ **Application de la charge**

Appliquez progressivement la charge à l'indenteur à l'aide de la machine d'indentation. La vitesse d'application de la charge peut varier en fonction des besoins de l'essai.

✓ **Maintien de la charge**

Maintenez la charge constante pendant une période de temps définie (habituellement quelques secondes) pour permettre au verre de se déformer sous l'effet de la charge.

✓ **Retrait de la charge**

Libérez lentement la charge de l'indenteur pour qu'il se retire de la surface de l'échantillon.

✓ **Mesure de l'empreinte**

Utilisez un microscope optique ou un système de mesure de la diagonale pour mesurer la taille de l'empreinte laissée par l'indenteur sur la surface du verre. Si vous utilisez la méthode Vickers, mesurez la diagonale de l'empreinte.

✓ **Calcul de la dureté**

Utilisez les données recueillies (charge, taille de l'empreinte) pour calculer la dureté du verre en utilisant la formule appropriée pour la méthode d'indentation choisie (par exemple, la formule Vickers ou Knoop).

✓ **Répétition des essais**

Répétez le test d'indentation plusieurs fois à différents endroits de l'échantillon pour obtenir des résultats représentatifs et réduire les erreurs dues aux variations locales de dureté.

✓ **Analyse des données**

Utilisez un logiciel d'analyse des données pour traiter les résultats, générer des graphiques et calculer la dureté moyenne du verre.

✓ **Interprétation des résultats**

Interprétez les résultats en fonction de vos objectifs de caractérisation des propriétés mécaniques du verre. Les résultats peuvent fournir des informations sur la dureté, la ténacité, la résistance aux rayures, etc.

### ✓ **Rapport des résultats**

Préparez un rapport de test qui inclut toutes les données pertinentes, les conditions de test et les conclusions. Il est important de suivre rigoureusement ces étapes pour réaliser un test d'indentation du verre de manière précise et reproductible. La qualité des résultats dépend de la précision de chaque étape du processus.

## **2.14 Mesure de la Dureté du Verre par Indentation**

La mesure de la dureté du verre par indentation est couramment réalisée à l'aide de méthodes telles que l'indentation Vickers ou l'indentation Knoop. Voici les étapes spécifiques pour mesurer la dureté du verre par ces méthodes [15]:

### **2.14.1 Mesure de la Dureté du Verre par Indentation Vickers**

#### ✓ **Préparation de l'échantillon**

Assurez-vous que l'échantillon de verre est propre et bien fixé sur un support stable.

#### ✓ **Sélection de l'indenteur**

Choisissez un indenteur Vickers, qui est une pyramide carrée à base quadrangulaire avec un angle de pointe de 136 degrés.

#### ✓ **Calibration de la machine d'indentation**

Calibrez la machine d'indentation en utilisant des étalons de dureté appropriés pour garantir des résultats précis.

#### ✓ **Réglage de la charge**

Déterminez la charge à appliquer à l'indenteur en fonction des propriétés du verre et des spécifications de l'essai.

#### ✓ **Positionnement de l'indenteur**

Placez l'indenteur au-dessus de la zone de l'échantillon où vous souhaitez effectuer l'indentation.

### ✓ **Application de la charge**

Appliquez progressivement la charge à l'indenteur à l'aide de la machine d'indentation. La charge est généralement maintenue pendant quelques secondes pour permettre au verre de se déformer.

### ✓ **Retrait de la charge**

Libérez lentement la charge de l'indenteur pour qu'il se retire de la surface de l'échantillon.

### ✓ **Mesure de l'empreinte**

Utilisez un microscope optique ou un système de mesure de la diagonale pour mesurer la diagonale de l'empreinte laissée par l'indenteur sur la surface du verre.

### ✓ **Calcul de la dureté**

Utilisez la formule de la dureté Vickers :  $HV = (2 * F) / (d^2)$ , où HV est la dureté Vickers, F est la force appliquée, et d est la diagonale de l'empreinte.

## **2.14.2 Mesure de la Dureté du Verre par Indentation Knoop**

Les étapes sont similaires à celles de l'indentation Vickers, à la différence près que l'indenteur utilisé est de forme Knoop, c'est-à-dire une pyramide allongée avec une pointe asymétrique. La mesure de la dureté Knoop se fait en utilisant la longueur de la diagonale longue de l'empreinte plutôt que la diagonale courte.

Quel que soit le type d'indentation utilisé, il est important de répéter le test à plusieurs endroits de l'échantillon pour obtenir des résultats représentatifs et de prendre en compte les variations locales de dureté. L'analyse des données et l'interprétation des résultats permettront de caractériser la dureté du verre, ce qui est essentiel pour de nombreuses applications industrielles et scientifiques.[13]

### ✓ **Les Contraintes Induites par l'Indentation sur le Verre**

Lorsque vous effectuez un test d'indentation sur le verre, cela crée des contraintes et des déformations dans le matériau. Ces contraintes sont dues à la force appliquée à l'indenteur et à la déformation plastique qui en résulte. [6]

Voici un aperçu des principales contraintes induites par l'indentation sur le verre :

### ✓ **Contraintes de compression**

Lorsque la charge est appliquée à l'indenteur et que celui-ci pénètre dans la surface du verre, il crée des contraintes de compression au sein du matériau sous l'empreinte. Les atomes et les liaisons moléculaires du verre sont comprimés et déplacés, provoquant une déformation plastique locale.

### ✓ **Contraintes résiduelles**

Après le retrait de la charge de l'indenteur, le verre conserve des contraintes résiduelles dans la zone de l'empreinte. Ces contraintes peuvent persister en raison de la déformation plastique du matériau et peuvent avoir un impact sur la résistance mécanique et la stabilité du verre.

### ✓ **Contraintes de traction**

Autour de la zone de l'empreinte, il peut y avoir des contraintes de traction, c'est-à-dire une tendance du verre à se dilater après la déformation plastique sous l'effet de la charge. Ces contraintes peuvent contribuer à la fragilité du matériau et augmenter le risque de fissuration.

### ✓ **Microfissures et écaillage**

En raison des contraintes induites par l'indentation, des microfissures ou des défauts peuvent se former autour de l'empreinte. Dans certains cas, cela peut entraîner un écaillage de la surface du verre, ce qui peut être préjudiciable, surtout si la surface du verre doit rester lisse et transparente.

### ✓ **Zone affectée par la déformation**

La zone affectée par la déformation sous l'empreinte de l'indenteur peut s'étendre au-delà de la zone immédiate de l'empreinte. Cela signifie que la déformation plastique peut affecter la structure du verre sur une certaine profondeur, en fonction de la charge appliquée et des propriétés du matériau.

### ✓ **Variations locales de dureté**

Les contraintes induites par l'indentation peuvent provoquer des variations locales de dureté dans le verre, ce qui signifie que la dureté peut varier en fonction de la position à l'intérieur de la zone d'empreinte.

# CHAPITRE 3

---

*MATERIAUX, PROCEDURES EXPERIMENTALES*

&

*Résultat et discussion*

---

### 3 Matériaux et procédures expérimentales

#### 3.1 Introduction

Le taux de maintien fait référence à la vitesse à laquelle une force ou une contrainte est appliquée sur le verre fragile. Il joue un rôle déterminant dans la façon dont le verre réagit et se déforme en réponse à cette contrainte. En général, un taux de maintien plus élevé se traduit par une déformation plus rapide, tandis qu'un taux de maintien plus faible permet une déformation plus lente. L'influence du taux de maintien sur les propriétés mécaniques du verre fragile est particulièrement importante en raison de la nature intrinsèquement fragile du matériau. Le verre fragile peut présenter un comportement différent à des températures différentes, ce qui peut affecter la réponse du matériau à la contrainte appliquée. La compréhension de cette influence est essentielle pour concevoir et utiliser de manière sûre et efficace le verre fragile dans diverses applications.

#### 3.2 But Du Travail : l'effet de l'indentation de temps maintint des propriétés mécaniques de verre

##### ✓ Verre utilisé

On a utilisé un verre commercial plat de type sodo-calcique d'une épaisseur de 6 à 8 mm. Ce verre est fabriqué par flottage par l'entreprise Méditerranéen Flot Glass, filiale de CEVITAL (Algérie).

##### ✓ Composition chimique :

Le tableau ci-dessous présente la composition chimique du verre du lot fabriqué, telle qu'elle a été fournie par

Le fournisseur:

Oxydes	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	FeO <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
--------	------------------	-----	-----	------------------------------------	------------------	-----------------	--------------------------------

<b>En masse %</b>	71.8	8.7	4.38	13.8	0.07 à 0.075	0.215	
-------------------	------	-----	------	------	-----------------	-------	--

**Tableau 3.1 : La composition chimique du verre est fournie par le fournisseur**

### 3.3 Caractéristiques usuelles à la température ambiante

Les caractéristiques physiques du verre utilisé ont été mesurées à la température ambiante, comme indiqué dans le tableau :

<b>Propriétés</b>	<b>Valeurs et unités</b>	<b>Technique de mesure</b>
Module élastique E	72 GPa	Grido-sonic
Coefficient de dilatation thermique	$8.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	dilatometre
Température de transition Tg	530 °C	dilatometre
Densité	2.52 g/cm <sup>3</sup>	Pycnomètre à Hélium
Dureté Vickers H <sub>v</sub>	4.7 GPa	duromètre
Coefficient de Poisson	0.22 GPa	ultrasons
Ténacité K <sub>IC</sub>	0.74 MPa.m <sup>1/2</sup>	Flexion S.E.N.B
Indice de réfraction	1.52	Réfractomètre d'Abbé
Transmission optique %	92%	

**Tableau3.2 : propriétés physiques du verre utilisé**



## 3.4 Equipements et procédés utilisés

### 3.4.1 Le nettoyage

L'acétone, en tant que substance extrêmement efficace, peut être employée pour éliminer diverses taches sur une variété de surfaces. Il s'avère être un excellent détachant capable de traiter efficacement les taches de peinture, de colle et d'autres substances similaires, tout en étant également efficace pour enlever le vernis à ongles. Cependant, il est essentiel de manipuler ce produit avec une grande prudence en raison de sa toxicité significative. L'acétone est largement utilisée en industrie et en laboratoire en raison de sa capacité à dissoudre rapidement de nombreuses substances organiques et de sa miscibilité avec l'eau.

#### ➤ Nettoyage de l'échantillon

L'échantillon doit être nettoyé avant d'être utilisé ; Utiliser de l'acétone ou au moins de l'alcool. Le nettoyage des échantillons doit se faire en portant des gants ou à l'aide d'une pince. Les étapes de nettoyage sont comme suit:

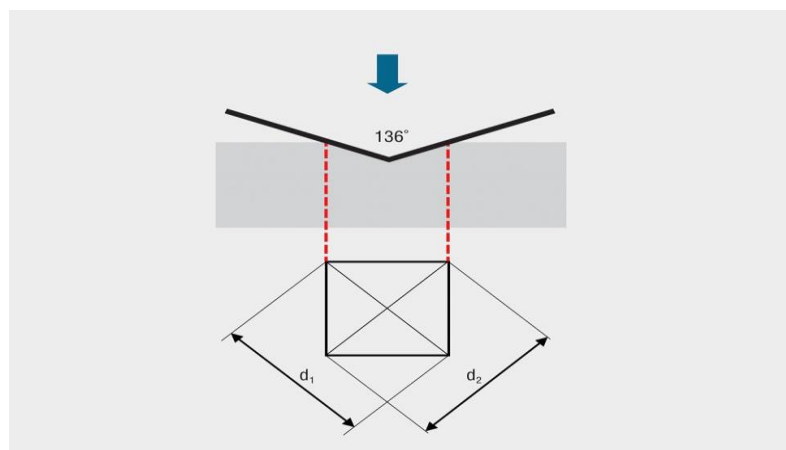
- ✓ Mettez la solution d'acétone dans un récipient
- ✓ Immerger les échantillons dans le récipient pendant 10 minutes, puis on les retire à l'aide d'une pince.
- ✓ Essuyez la surface d'échantillon avec un coton.



Figure 3.1 : Produits utilisés pour le nettoyage des échantillons.

### 3.4.2 Dispositif expérimental

- **Machine macro-indentation**



**Figure 3.2 : Schéma représenté une empreinte Vickers et de la fissuration**

La technique de macro-indentation est employée pour évaluer les propriétés mécaniques d'un matériau, notamment sa dureté  $H$  et son module d'élasticité  $E$ , en fonction de certains paramètres, tels que la charge appliquée. Dans notre étude, nous avons utilisé l'indentation Vickers sur des échantillons à la surface polie. Cela a été réalisé à l'aide d'un indenteur sous forme d'une pyramide en diamant de base carrée, avec un angle au sommet entre les faces de 136 degrés. Nous avons appliqué des charges allant de 1 et 2 N,

Le pénétrateur a été maintenu en position pendant une période de 10 à 20 secondes avant d'être relâché complètement, avec une vitesse de chargement de 0,5 mm/min et de déchargement de 0,1 mm/min. Un logiciel dédié a été utilisé pour afficher la courbe de charge en fonction de la pénétration directement sur l'écran. Pour visualiser l'empreinte laissée par l'indentation et prendre des mesures telles que la diagonale de

l'empreinte (2a), la longueur de la fissure (2c), la dureté (Hv), le module de Young (E), etc., nous avons déplacé l'objectif de l'appareil.



**Figure 3.3** : Duromètre de type QTAM-QNESS 30M.

- **Duromètre QNESS 30 m**

L'outil central employé au cours de cette étude est le duromètre instrumenté. Une illustration représentant le Duromètre QNESS 30 m, de la marque Zwick/Rolle (Zwick Hardiesse Unity), doté d'une charge maximale de 3 kN, est présentée dans la figure ci-dessous.



**Figure 3.4** : duromètre de types QTAM6-QNESS 30M

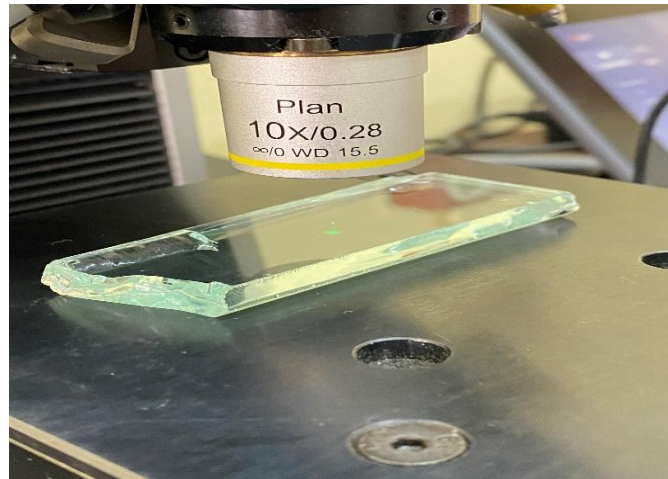
- **microscope optique**

Le microscope est constitué d'un banc optique comprenant une composante placée en amont de l'objet (l'éclairage) et une autre positionnée en aval de l'objet. Il offre la possibilité d'examiner avec minutie et précision des échantillons grâce à divers paramètres ajustables

Et une mise au point précise.

Ces caractéristiques augmentent la précision et l'efficacité de l'observation microscopique

Effectuée lors de notre travail avec le duromètre QTAM-QNESS 30M.



**Figure3.5** : Un microscope optique intégré dans le duromètre QTAM-QNESS 30M

### 3.4.3 Formules utilisés

➤ **Dureté** : La dureté Vickers a été calculée selon la relation suivante :

$$Hv = 1.854 \times F / (2a)^2$$

Avec :

Hv : Dureté Vickers [GPa]

F : la charge appliquée [N].

2a : la diagonale de l'empreinte [ $\mu\text{m}$ ].

➤ **Module d'Young**

Le module élastique E déduit à partir de l'essai d'indentation a été calculé par la formule suivante :

$$E_{it} = (1 - \nu_s^2)[5.66(h_{max} - 0.64 F_{max} SS - 1 - \nu_d^2 E_d)]^{-1}$$

$\nu_s$ : coefficient de poisson de l'échantillon.

$s = dF/dH$  pour une charge maximale  $F_{max}$ .

$H_{max}$  : Déplacement (pénétration de l'indenteur) maximale.

$\nu_d$  : Coefficient de poisson de l'indenteur en diamant est égale 0.1.

$E_d$ : Module élastique de l'indenteur est égale 1000 GPa.

### ➤ **Ténacité**

La ténacité d'un matériau se réfère à sa capacité à résister à la propagation d'une fissure, en opposition à la fragilité, qui est quantifiée par le facteur d'intensité de contrainte critique  $K_{Ic}$ . La détermination de ce facteur se fait au moyen du test d'indentation Vickers, en utilisant simultanément des données telles que la dureté Vickers (HV), la longueur moyenne de fissure radiale ( $2c$ ), le module d'élasticité et la charge appliquée obtenus lors du test précédent. Pour mesurer la ténacité par indentation de manière précise, il est nécessaire d'avoir un matériau possédant une surface plane et polie, ainsi qu'un équipement expérimental approprié pour mesurer la taille des fissures formées.

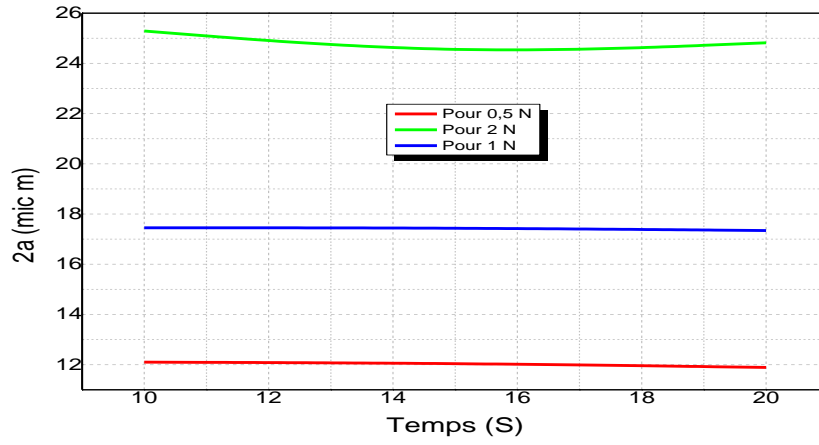
## **3.5 Résultat et discussion**

### **3.5.1 Caractérisation mécanique**

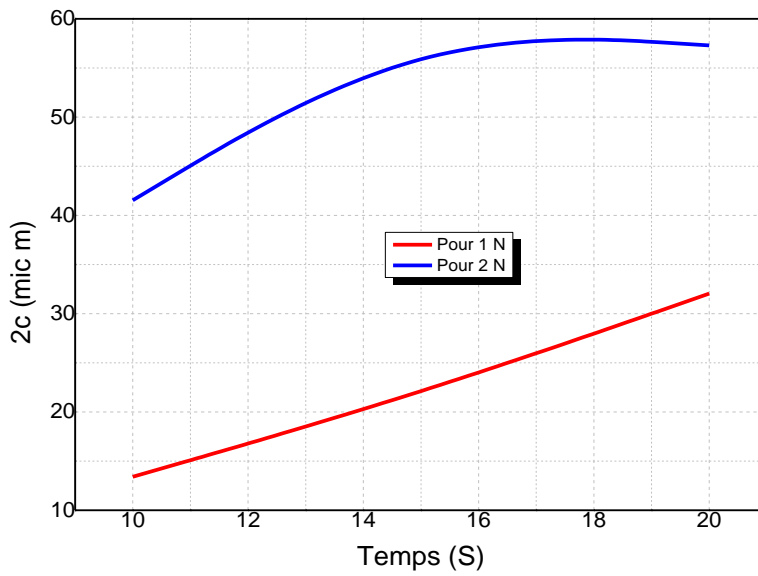
#### ➤ **Dureté Vickers**

Nous avons mesuré les longueurs des fissures radiales ( $2C$ ) dans les deux directions orthogonales (parallèles et perpendiculaires, figure III.6 ) sur chaque état recuit et trempés chimiquement (simple et double échange ionique). Les charges employées sont comprises entre (3, 5 et 10 N). La mesure des longueurs des fissures a été faite à l'aide d'un microscope optique intégré au microduromètre.

Les 3 figures (III.6, 7, 8): présentent la variation de la longueur des fissures radiales en fonction de temps pour les différentes charges (0.5N, 1N, 2N). On remarque que pour toutes les courbes obtenues, avec les différents charges, une diminution des longueurs  $2C$  à un temps puis augmente jusqu'à atteindre les valeurs des longueurs des fissures du verre.. Il apparaît que le temps de maintien a un effet notable sur la fissuration. Des temps plus allongés engendrent des fissures moins importantes.



**Figure 3.6:** Empreintes et fissures induites par indenteur Vickers avec une charge 0.5N. 1N. 2N par rapport le temps sur le verre



**Figure 3.7 :** Evolution de 2C en fonction de temps s pour une charge 1N , 2N

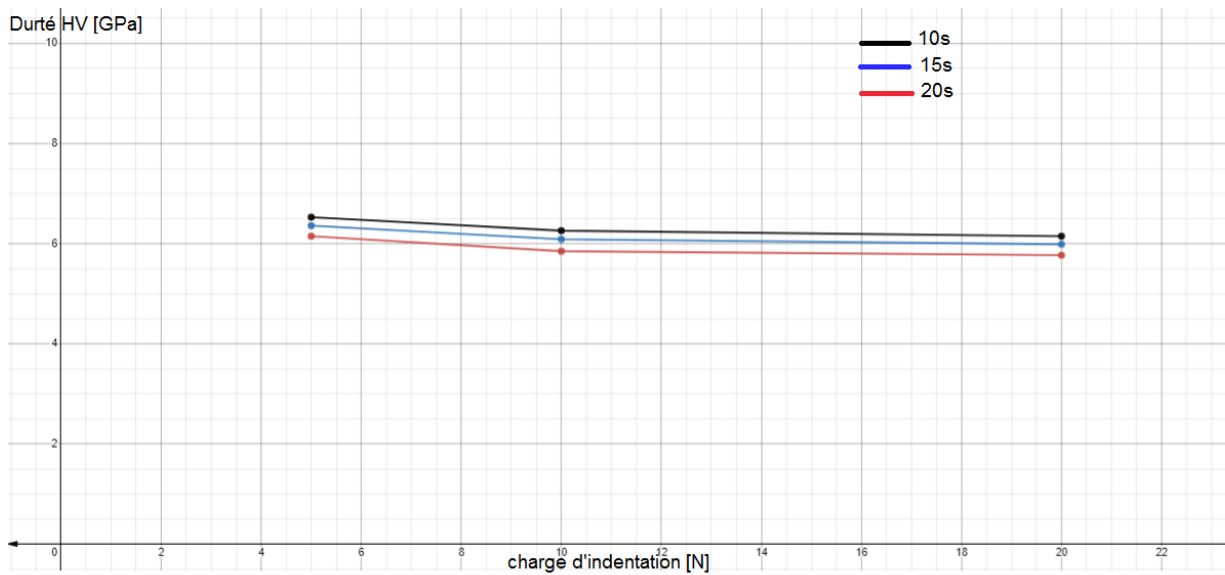


Figure 3.8: Variation de la dureté du verre en fonction de la charge 0,5N. 1N. 2N par rapport au temps

### ➤ Facteur d'intensité de contraintes KIC

D'après la figure III.9: qui représente la variance de KIC en fonction de la charge d'indentation,

- on observe une légère variation de ténacité avec l'augmentation de la charge d'indentation (ANSIS et Niihara),
- nous remarquons aussi que toutes les courbes sont similaires avec la présence de petits écarts, pour toutes les charges.

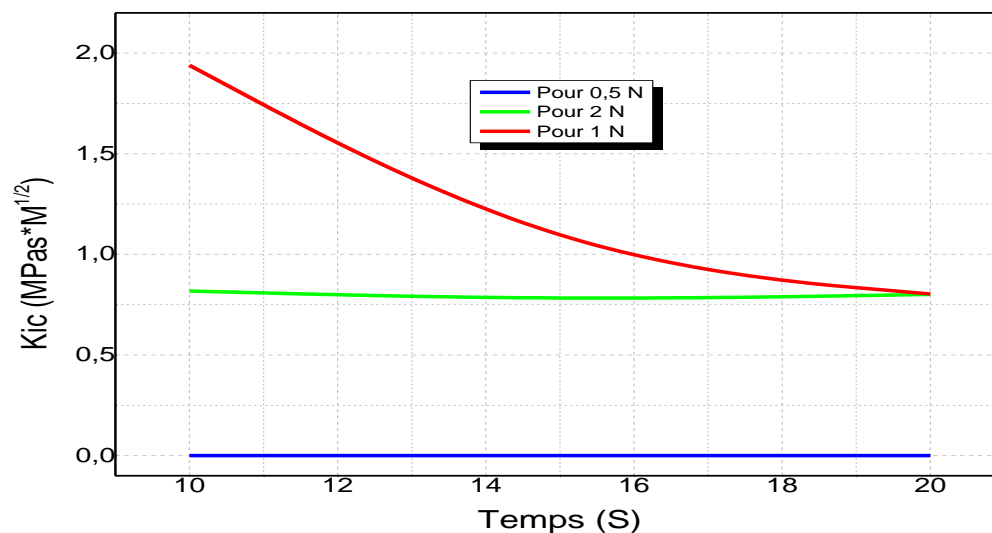
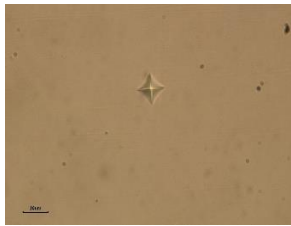
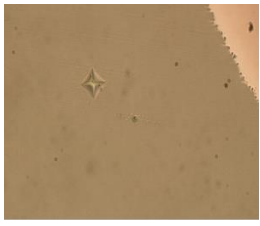
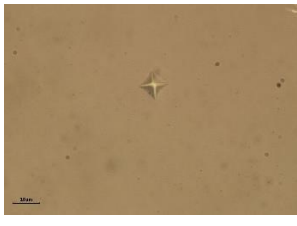
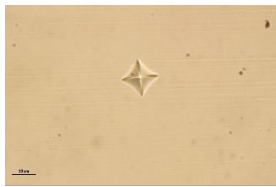


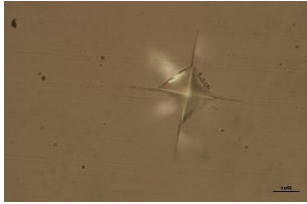


Figure 3.9 : Evolution de la ténacité pour une charge 0,5N. 1N. 2N en fonction de temps s

### 3.6 Observations microscopiques

	0.5N	1N	N
10s			
15s			
20s			

**Tableau 3.3 : l'observation microscopique du verre**

Le **Tableau III.3** représenté les différent micrographie (0.5N, 1N, 2N) pour les différent temps maintint (10S, 15S, 20S) donc on remarque qu'il y a une certain différent entre les différent micrographie cela confirme les résultats obtenir.



# Conclusion

---

Dans cette mémoire, l'objectif principal est d'étudier les propriétés mécaniques du verre sodo-calcique, Le procédé d'élaboration utilisé pour préparer les échantillons de verre consiste en une d'effectuer plusieurs essais d'indentation à différents endroits, pour voir des résultats obtenus montrent que les propriétés mécaniques dépendent principalement le type du matériau.

- La dureté Vickers et la ténacité (le facteur d'intensité de contraintes KIC) et moi élève chaque fois que la charge était augmenté.

-Nous avons constaté que l'effet de la charge sur le matériau augmente avec le temps

# Références

---

- [1] J. Zarzycki, *Materials Science and Technology*, Vol.9, Weinheim, New York, 1991
- [2] L. Wen, G. Jijian, *J. Am. Ceram. Soc. Bull.* 80, 3, 62. (2001)
- [3] A. El Kadrani, Thèse de l'université de bordeaux1 (2003).
- [4] J.m. haussonne et c. carru. traité des matériaux16. Cramiques et verres. Principes et techniques d'élaboration. Presses polytechniques et universitaires romandes 1998
- [5] J. E. Shelby, D. E. Day, Mechanical relaxation in mixed-alkali silicate glasses *J. Am. ceram. Soc.* 52,169-174[1969]
- [6] 11 LOURS, Mathieu. « Un problème insoluble : l'entretien des 'vitres peintes' dans les églises parisiennes au XVIIIe siècle », dans *Verre et Fenêtre de l'Antiquité au XVIIIe siècle*, Op.cit., p.171-176. \* Voir la signification des termes techniques indiqués par un astérisque dans le glossaire en annexe. 12 « Marguiller, s. m. Trésorier de la fabrique de l'Église. Administrateur de choses qui appartiennent à l'Église ». RICHELET, Pierre. *Dictionnaire françois, contenant généralement tous les mots tant vieux que nouveaux et plusieurs remarques sur la langue françoise*, Amsterdam : Éd. J. Elzevir, 1706, p.493.
- [7] Marie-Noëlle Sanz, Anne-Emmanuelle Badel, François Clausset, «Physique tout-en-un1 re année », ISBN 2100079506, Paris 2003.
- [8] Sanchez, C.; Boissiere, C.; Cassaignon, S.; Chaneac, C.; Durupthy, O.; Faustini, M.; Grosso, D.; Laberty-Robert, C.; Nicole, L.; Portehault, D.; Ribot, F.; Rozes, L.; Sassoie, C. *Chem. Mater.* 2014, 26, 221–238.
- [9] Aburas, M., Soebarto, V., Williamson, T., Liang, R., Ebendorff-Heidepriem, H., Wu, Y., 2019. Thermochromic smart window technologies for building application: A review. *Appl. Energy* 255, 113522. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113522>
- [10] Chabas A., Lefèvre R.A. Soiling of soda-lime-silica float glass in the polluted atmosphere of Paris *Glass Technol.* 2002, 43C, 79-83
- [11] G. Girault, Contribution à l'étude de portes optiques à base d'amplificateurs optiques à semi-conducteurs pour le traitement tout-optique de signaux de telecommnication à très hauts débits. PhD thesis, Université de Rennes 1, 2007.
- [12] H. Masuda, Y. Ohta and K. Morinaga, *J. Japan Inst. Metals* 59(1) (1995), 31-36.

1 **[13] Dir Assia , Taibi Zina , SYNTHÈSE ET CARACTÉRISATION DES VERRES SPECIAUX A BASE D'OXYDE D'ANTIMOINE , Université L'arbi Ben Mhidi Oum El Bouaghi ,(2020).**

2 **[14]<https://www.hqe.guidenr.fr/cible-2-hqe/verre-proprietes-physiques.php>**

[15] Jean –Marie Haussoy, Claude Carry, Paul Bowen, James Barton, Céramique et verre

[16] Baltus. C et Hauglustaine. J.M, « Types de vitrage, réinventons l'énergie » LEMA, Département d'Architecture et d'Urbanisme, Université de Liège, Belgique, Février 2003.

[1]Gottlander, M., Johansson, C. B., & Albrektsson, T. (1997). Short- and long-term animal studies with a plasma-sprayed calcium phosphate-coated implant. *Clinical Oral Implants Research*, 8(5), 345–351.

[2] Dr. B. JACQUOT, « Propriétés mécaniques des Biomatériaux utilisés en Odontologie», Société Francophone des Biomatériaux Dentaires (SFBD), 2010

[3] E. Gamsjager, T. Antretter, C. Schmaranzer, W. Preis, C.M. Chimani, N.K. Simha, J. Svoboda, F.O. Fischer. Diffusional phase transformation and deformation in steels. *Computational Materials Science*, Volume 25 (2002) 92-99.

[4] Woïrgard, Dispositif de dureté instrumentée de l'université de Poitiers

[5] Q. Alberto, E. Cattaruzza, F. Gonella, Modelling the ion exchange process in glass : Phenomenological approaches and perspectives, *Materials Science and Engineering B* 149, pp. 133-139, 2008, doi : 10.1016/j.mseb.2007.11.016.

[6] F. Célarié, Dynamique de fissuration à basse vitesse des matériaux vitreux, thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, 2004.

[7] Iost, A.; Bigot, R. Indentation size effect: Reality or artefact?. *Journal of Materials Science*, v. 31, n. 13, p. 3573-3577, 1996.

[8] Dr. B. JACQUOT, « Propriétés mécaniques des Biomatériaux utilisés en Odontologie», Société Francophone des Biomatériaux Dentaires (SFBD), 2010.

[9] Marc Marzano/ Action composite, Pascal celle, DNFA, (Dossier pédagogique, ANFA), 2014

[10] PERRIOT, A., «Nonindentation de couche minces déposées sur substrat de verre de silice» Université de Paris VI, 2005, p.178.

[11] PETIT, F., VANDENEDE, V., CAMBIER, F., «Relevance of instrumented micro-indentation for the assessment of hardness and Young's modulus of brittle materials» *J. Mater. Sci. and Engin.*, A456, 2006, pp. 252-260.

- [12] DONALD, W., review « Methods for improving the mechanical properties of oxide glasses », *J. of Mat. Sci.* vol.24, 1989, p. 4177-4208
- [13] Zhu W., Bartos P. J., Application of depth-sensing micro-indentation testing to study of interfacial transition zone in reinforced concrete, *Cement and Concrete Research* 30 (2000) 1299-1304.
- [14] ALBERTO, P., « L'indentation Vickers et Knoop des matériaux massifs ou revêtus : Dureté, ténacité, et adhérence » Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, 2003, pp.15-16.
- [15] Strange D.J; Varshneya, A.K. Finite element simulation of microindentation on aluminum. *Journal of Materials Science*, v. 36, p. 1943-1949.
- [16] <https://www.directindustry.fr/prod/leco/product-114499-1153211.html>
- [17] <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2017/ra/c7ra06491h>

## Résumé :