



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Med Khider Biskra

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

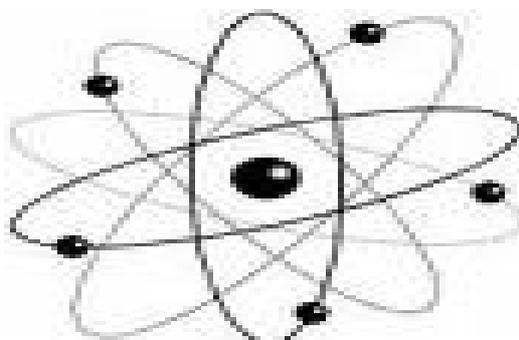


Département des Sciences de la Matière

Domaine des Sciences de la Matière

Filière de Physique

Spécialité Physique des Matériaux.



Mémoire de fin d'étude en Master

Intitulé :

**Elaboration, mesure mécaniques et élastiques des
verres**

$Sb_2O_3-Li_2O-MoO_3 (WO_3)$

Présentée par:

Slimani Hayet

Devant le Jury Composé par :

HAMZAOUI MAJIDA

DR

Université Med Khider- Biskra

Président

SOLTANI Med Toufik

DR

Université Med Khider- Biskra

Rapporteur

HACHANI SOUAD

DR

Université Med Khider - Biskra

Examineur

Année Universitaire

2013-2014

REMERCIEMENTS :

Mes remerciements vont premièrement à dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il ma donnée durant toutes ces années d'étude.

J'exprime mes profondes gratitudes à mes parents pour leur encouragement, leur soutien et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.

Ainsi, j'adresse mes sincères remerciements à monsieur Soltani.

Mohamed Toufik, qui a encadré ce mémoire, m'a accompagné au quotidien dans la préparation de ce travail.

Je voudrais également remercier ma damoiselle Malika Nouaji pour l'aide et le soutient, ainsi à toutes mes collègues aux laboratoire de physique de l'université de Biskra.

Je remercier aussi mes amis avec qui j'ai partagé tant de moments de vie, heureux ou difficiles, et qui m'ont aidé à traverser certaines épreuves au cours de cette période.

Merci.

<i>Remerciement</i>	i
<i>Sommaire</i>	ii
<i>Introduction générale</i>	02
<i>Bibliographie</i>	03

Chapitre I : Généralité sur les verres

I	Introduction	05
I.1.	I.1 Histoire	06
I.2.	Définition du verre	06
I.3.	Elaboration de verres	06
I.4	Définition de l'état vitreuse	07
I.5.	Zone de transition vitreuse	08
I.6.	Formation de verre	09
I.7.	D'oxyde d'antimoine	12
I.8.	Les verres d'oxyde d'antimoine	12
Bibliographie		13

Chapitre II : synthèse de verre et technique expérimentaux

II.1.	Synthèse des verres	15
II.1.1.	Produits de départ	15
II.1.2.	Choix du creuset	15
II.1.3.	Pesées des composition des verres	15
II.1.4.	la fusion des composants de verres	16
II.1.5.	Le coulage	17
II.1.6.	.Recuit des verres	17
II.1.7.	Polissage de verres	17
II.2.	Modules élastique	18
II.2.1.	Définition	18
II.2.2.	Principe expérimental	19
II.2.3	L a micro-dureté	21

II.2.3.1.	Définition	21
	Bibliographie	22
<i>Chapitre III : Résultats et discussions</i>		
III.1.	Introduction	24
III.2.	La domaine vitreux	24
III.3.	Résultat et discussion	25
III.3.1.	Module élastique	26
III.3.2.	La mesure des vitesses	26
III.4.	Interprétation des résultats	28
III.5.	Mesure des modules élastique	29
III.5.1.	Interprétation des modules élastique	33
III.6.	Température Debye	33
III.7.	La micro-dureté	35
	Bibliographie	37
	<i>Conclusion générale</i>	39

Introduction générale

Introduction générale :

Un composé amorphe est un composé dans lequel les atomes ne respectent aucun ordre à moyenne et grande distance, ce qui le distingue des composés cristallisés. Les verres, les élastomères et les liquides sont des composés amorphes.

Plus récemment, les recherches se sont orientées vers l'étude des verres riches en oxyde d'antimoine, verres déjà signalés depuis plusieurs années et qui touchent à des champs d'applications différentes de la science des matériaux [8-12]. Ces verres se distinguent par des propriétés de photosensibilité [9,10], des caractéristiques optiques non linéaires [11,12]. Ces dernières sont liées à l'hyper polarisabilité de la paire libre de l'antimoine (III) [14]. On a aussi pu développer des vitrocéramiques transparentes contenant des nanoparticules de Sb métallique induisant un fort effet non linéaire [15].

Le but de ce travail est se base essentiellement sur la mesure des propriétés mécaniques et élastiques sur les verres a base d antimoine et voir surtout l'effet de la substitution de WO₃ ou MoO₃ a la place de l'oxyde d'antimoine sur ces propriétés .Les oxydes MoO₃et WO₃sont classés comme étant des oxydes intermédiaires [13] puisque ils ne forment pas de verre à eux tous seuls, mais en revanche, leur addition à l'oxyde d'antimoine contribue à la vitrification du réseau.

L'articulation de ce mémoire suit le cheminement suivant :

Le premier chapitre de ce mémoire effectue une présentation générale sur les verres et l'état vitreux.

Le second chapitre concerne la description de différentes techniques expérimentales qui ont été utilisées pour de synthèse des verres du système ternaire Sb₂O₃- Li₂O- MoO₃ et Sb₂O₃- Li₂O-WO₃.

Le troisième chapitre rassemble les résultats des mesures et leurs interprétations

Enfin ,on résumé l'essentiel de ce travail dans la conclusion .

Bibliographie

- [1] B.V.R Chowdari, S. K. Akhter, Solid State Ionics 25 (1987) 109.
- [2] S. K. Akhter, Solid State Ionics 51 (1992) 305.
- [3] W.H.Dumbaugh, Phys. Chem. Glasses 19 (1978) 121.
- [4] H.Burger, W. Vogel, V. Kozhukharov, Infrared Phys. 25 (1985) 395.
- [5] Y.S.Kim, H. Kim, J. Heo, in: B.G. Potter, A.J. Bruce. (Eds), Synthesis and Application of Lanthanides-Doped materials, American Ceramic Society, Westerville OH, 1996, P59.
- [6] S. Wang, E. M. Vogel, E. Snitzer, Opt. Mater. 3 (1994) 187.
- [7] E. M. Vogel, M. J. Weber, D. M. Krol, Phys. Chem. Glasses 32 (1991) 231.
- [8] M. Nalin, S.J.L. Ribeiro, M. Poulain, Mi. Poulain, Y. Messaddeq, J. Non-Cryst. Sol. 284 (2001) 110.
- [9] F.S. De Vicente, M.S. Li, M. Nalin, Y. Messaddeq, J. Non-Cryst. Sol. 330 (2003) 168.
- [10] M. Nalin, Y. Messaddeq, S.J.L. Ribeiro, M. Poulain, V. Briois, J. Optoelectr. Adv. Mater. 3 (2001) 553.
- [11] J.C. Sabadel, P. Armand, D. Cachau-Herreillat, P. Baldeck, O. Doclot, A. Ibanez, E. Philippot, J. Solid State Chem. 132 (1997) 411.
- [12] E.L. Falcão-Filho, C.B. De Araujo, C.A.C. Bosco, G.S. Maciel, L.H. Acioli, M. Nalin, Y. Messaddeq, J. Appl. Phys. 97 (2005) 013505.
- [13] B. Zhang, Q. Chen, L. Song, H. Li, F. Hou, J. Zhang, J. Non-Cryst. Solids. 354 (2008) 1948.
- [14] R.L. Sutherland, Handbook of Non-Linear Optics, Marcel Decker, New York, 1996.
- [15] J. Sasai, K. Hirao, J. Non-Cryst. Solids. 290 (2001) 49.

Chapitre I :

Généralité sur les verres

I.1 Introduction :

Le verre est un des premiers matériaux que l'homme a utilisé (déjà présent à la préhistoire!) et mis au point. Il est un des matériaux rêvé par l'homme pour sa symbolique fragilité, finesse et transparence. Il possède de nombreuses qualités. Il est facile à modeler, transparent et peut prendre de nombreuses formes. Ces qualités le placent dans divers domaines: dans le vitrage, ustensile de cuisine et décoration.

Au 20ème siècle, le développement formidable de la science et la technologie a promu le verre à un rang d'un matériau noble pour plusieurs applications fines. La technologie verrière utilisé actuellement a permis d'atteindre des performances remarquables dans tous les domaines connexes de l'optoélectronique: fibres optiques pour les télécommunications, Revêtements anti-réfléchissant pour capteurs solaires, lasers médicaux et industriels.

Plus récemment, les recherches se sont orientées vers l'étude d'autres verres à oxyde lourds tel que l'oxyde d'antimoine. Ces verres se distinguent par des propriétés de photosensibilités et une bonne stabilité thermique et de transparence dans l'infrarouge jusqu'à $8\mu\text{m}$. Sb_2O_3 a déjà été introduit comme additif a des verres d'oxyde pour améliorer son caractérisations mécaniques et élastiques.

I.1. Histoire :

Le verre a été l'un des premiers matériaux utilisés par les hommes préhistoriques pour réaliser des outils tranchants : l'obsidienne, verre d'origine volcanique est composé à environ 80 pour cent de silice. La première fabrication de verre par l'homme date de 12 000 ans avant J.-C. : il s'agit d'émaux décorant les céramiques. Puis vient l'élaboration de flacons par la technique du noyau (sorte de moulage) 1500 avant J.-C., et le soufflage au premier siècle. Enfin, la fabrication du verre plat par coulée sur une table métallique fut découverte en France au XVII^{ème} siècle. Ce procédé, modernisé et optimisé (laminage, polissage,...) fut utilisé jusqu'à l'invention de la technique dite « float », qui consiste à couler le verre sur un bain d'étain. Cette technique rend inutile le laminage et le polissage.

Dans le domaine scientifique, jusqu'au XX^{ème} siècle, la recherche a porté essentiellement sur la composition du verre. En particulier, l'invention d'instruments d'optique a fortement contribué à l'avancée des connaissances sur le verre (ajout d'oxyde de plomb pour augmenter l'indice de réfraction, diversification des compositions des verres d'optique par ajout d'oxyde de bore et de phosphore). L'intérêt pour la structure du verre n'a pris son essor, en revanche, que dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle, fortement stimulée par l'apparition de technologies modernes mettant en œuvre des verres (télécommunications par fibres optiques, xérographie, par exemple).

I.2. Définition du verre :

Par verre, on désigne à un solide non cristallin, présentant le phénomène de transition vitreuse [1]. Cette définition est plus générale que celle du langage courant ou l'on comprend par verre un matériau fragile et transparent. Elle englobe les matériaux amorphes. C'est-à-dire les matériaux obtenus par refroidissement, mais exclut les matériaux non cristallins qui n'ont pas la stabilité interne requise. En effet, l'état vitreux est un état solide métastable, qui peut présenter un ordre au niveau des liaisons interatomiques mais qui est désordonné, tout comme les liquides à plus grande échelle.

I.3. Élaboration de verre:

On peut obtenir le verre par trois voies différent:

1-A partir d'une phase gazeuse par la condensation du gaz (vapeur) qui donne de verre sous forme des couches minces, cette méthode est applicable aux métaux Si, Ge et les alliages métalliques.

2-A partir d'une phase solide par la déformation de la structure cristalline sous l'effet du rayonnement ou des actions mécaniques.

3-A partir d'une phase liquide, cette technique est la plus employée dans la synthèse du verre; elle est basée sur de fondre les matériaux principaux jusqu'à l'obtention d'un liquide surfondu qu'il suivi par un refroidissement très rapide (vitesse de refroidissement suffisamment rapide) pour éviter la recristallisation.

I.4. Définition de l'état vitreux:

Comme nous avons vu dans le paragraphe précédent la manière classique de produire un verre consiste à refroidir un liquide suffisamment rapidement pour que la cristallisation n'ait pas le temps de se produire.

Pour étudier et comprendre ce processus avec plus de précision on peut suivre l'évolution d'un variable thermodynamique tel que par exemple le volume spécifique V en fonction de la température T (Figure I-1). En partant d'un liquide aux températures élevées, lors de refroidissement le volume V décroît; lorsqu'on atteint le point de solidification (T_F) deux phénomènes peuvent se produire: pour de traitement de durée infinie le liquide sera cristallisé dont le volume spécifique V se contracte (une discontinuité survient) et devient plus faible que celle de liquide surfondu cette état décrit par la pente de la courbe étant toute fois inférieure à celle de liquide initiale (environ $1/3$). Dans la deuxième cas si le refroidissement est continu et rapide le liquide peut se trouve dans un état de surfusion thermodynamiquement métastable dans un domaine de température inférieure à la température de fusion. Ce cas est indiqué par une portion de courbe prolongeant celle du liquide. Après le passage de ce domaine le liquide va progressivement se figé pour donner naissance d'un verre à température ambiante cette état correspond à une coude de la courbe de refroidissement qui correspond la température de transition vitreuse ; cette coude diminue pour devenir voisine de celle du solide cristallin correspondant.

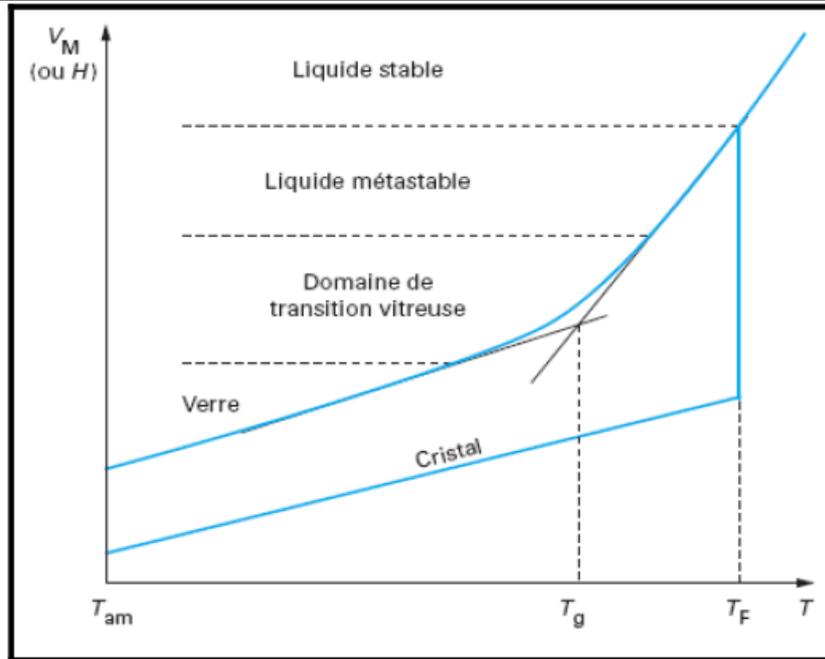


Figure (I-1): Variation thermique du volume spécifique V (H) en fonction de la température T ; définition des températures caractéristiques.

- T_g : température de transition vitreuse.
- T_F : température de fusion.

A chaque étape du refroidissement le liquide atteint un état d'équilibre interne suivant les variations de température cependant; quand la température s'abaisse la viscosité du liquide s'accroît jusqu'à la température de transition vitreuse voisine de 10^{13} , pour le verre silicaté. Donc selon Zarzycki on peut redéfinir le verre comme un solide non cristallin présentant un phénomène de transition vitreuse.

I.5. Zone de transition vitreuse

La zone de transition vitreuse correspond à la zone de température entre le domaine vitreux et le domaine cristallin. Cette zone est appelée zone de vitrification lors du refroidissement de la matière liquide jusqu'à l'état solide et zone de ramollissement lors du chauffage du matériau solide jusqu'à l'état liquide. Ils présentent en effet, dans ce domaine, un comportement fragile et cassant, analogue à celui du verre, qu'ils perdent en se ramollissant, c'est-à-dire en acquérant un comportement plus visqueux. La zone de transition

vitreuse s'étend ; selon le matériau amorphe considéré, sur un domaine plus ou moins large de température [5].

En raison des difficultés d'évaluation des propriétés dans cette zone, on obtient souvent des résultats divergents de la méthode utilisée.

Dans le domaine de transition vitreuse, les propriétés évoluent de manière continue. La figure (I.2) montre l'évolution de la capacité thermique dans le domaine de transition. Le phénomène de transition vitreuse est caractéristique d'un verre [6].

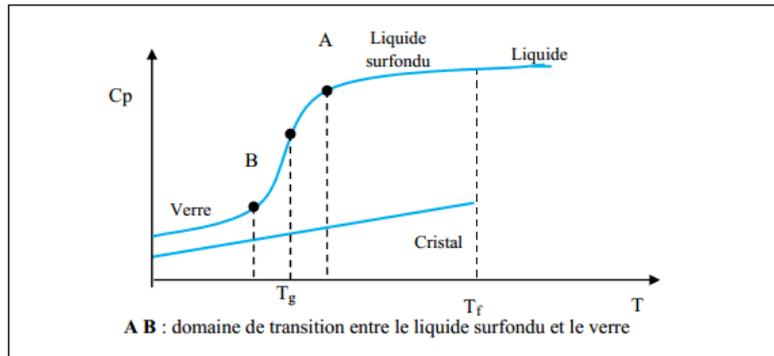


Figure I.2 : Évolution de la capacité thermique à pression constante dans le domaine de transition vitreuse en fonction de la température [6].

I.6. Formation de verre :

Pour expliquer la formation des verres, plusieurs approches, très empiriques, ont été proposées. Ils sont basés sur des critères cristallographiques, thermodynamiques ou sur des considérations concernant la nature de la liaison. Parmi ces modèles on citera les suivant :

➤ **Modèle de Goldschmidt :**

En 1926, Goldschmidt, influencé par les études sur les cristaux [2]. ce critère consiste à juger de la possibilité de vitrification des oxydes simples de formules stoechiométrique A_mO_n .

Selon GOLDSCHMIDT les oxydes pouvant former le verre doivent satisfaire à la condition :

$$R_g = R_c/R_a \text{ est compris entre } (0,2 - 0,4)$$

Ou : R_c : est le rayon du cation

R_a : est le rayon anion de l'oxygène.

➤ **Modèle de Zachariasen :**

Six ans plus tard Zachariasen étendu les idées de Goldschmidt. Zachariasen a noté que les cristaux de silicate forment facilement des verres aux lieux d'arrangement tétraédrique compact décrite par Goldschmidt. En postulant que les polyèdres d'oxygène dans les cristaux

d'oxyde serait également présent dans les verres, Zachariasen formé le concept d'une structure de réseau aléatoire continu pour un verre, avec arrangement structural périodiques empêché par des orientations aléatoires. Ceux-ci peuvent être atteints par des variations dans les angles de liaison et de longueurs de liaison, ou par rotation d'unités structurales [5]

Un oxyde simple $A_x O_y$ donne naissance à un verre, si :

*Chaque atome de A est entouré par un faible nombre d'atomes d'oxygène (3 ou 4) formant ainsi un polyèdre.

*Ces polyèdres sont reliés les uns aux autres par leurs sommets et non par une arête ou une face.

*La formation d'un réseau tridimensionnel impose qu'au moins trois sommets du polyèdre soient reliés aux polyèdres voisins.

*Un atome d'oxygène échange au maximum deux liaisons avec le cation A.

*Si la composition comporte un autre oxyde et en particulier un oxyde alcalin M_2O , les oxygènes liés à deux cations A n'échangent pas de liaison avec un cation M.

A partir de ces règles, Zachariasen définit essentiellement trois classes d'oxydes :

a)-Les oxydes formateurs de réseau :

Sont les oxydes simples qui par refroidissement, conduisent à un verre : SiO_2 , GeO_2 , B_2O_3 , As_2O_3 , P_2O_5 . La liaison entre les tétraèdres voisins se fait par l'intermédiaire d'un oxygène « *pontant* », sommet commun à deux tétraèdres.

b)-Les oxydes modificateurs de réseau :

sont essentiellement les oxydes alcalins M_2O , et les oxydes alcalino-terreux MO , composés essentiellement ioniques. L'introduction de ces oxydes dans le réseau du verre a pour conséquence de dépolymériser le réseau en rompant des ponts pour former des entités l'oxygène porteur d'une charge électronique excédentaire, n'établit plus la liaison entre tétraèdres voisins. C'est un oxygène « *non pontant* ».

c)-Les oxydes intermédiaires :

Certains oxydes, suivant la composition du verre, se comportent soit comme des formateurs de réseau, soit comme des modificateurs. Al_2O_3 , Fe_2O_3 , PbO , TiO_2 , ZnO , MoO_3 , WO_3 pour les plus connus. [2]

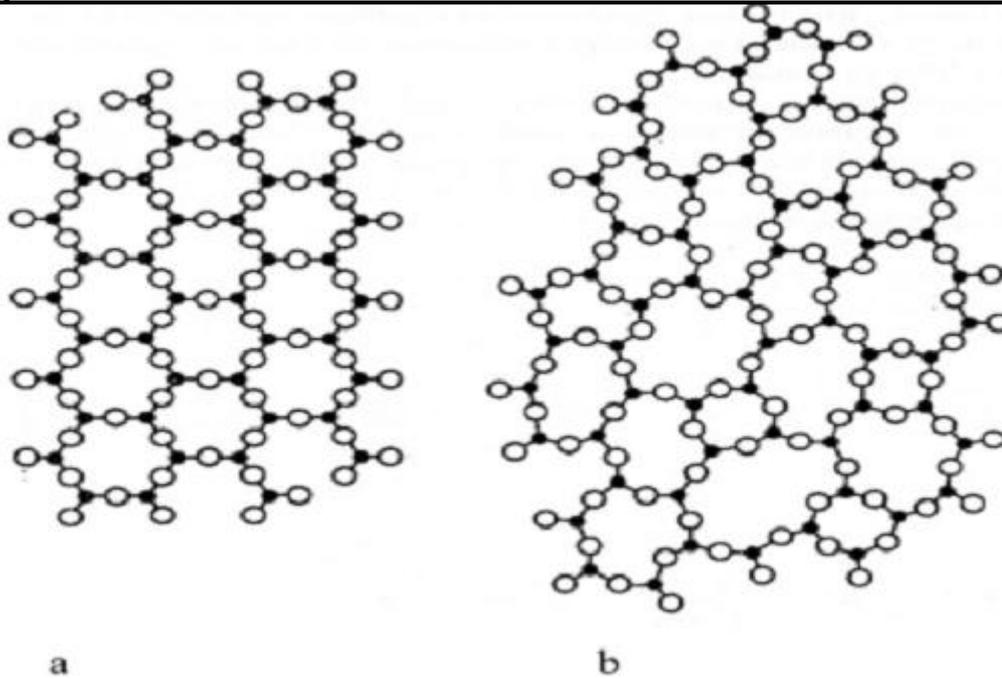


Figure (I-2): Représentation bidimensionnelle de a) la structure de la silice cristalline et b) d'un verre silicaté selon Zachariasen. ●: Si, ○: Oxygène [1].

➤ **Modèle de Poulain :**

En (1989) suite aux multiples recherches sur les verres fluorés, Poulain a proposé un nouveau modèle concernant les verres multi composants halogénés. Selon Poulain, le verre est un empilement compact mixte anionique et cationique, les anions et les cations de grandes tailles jouant un rôle structural similaire. Les sites vides proches des cations seraient vides en raison des répulsions électrostatiques. D'autre part ces cations empêcheraient la diffusion des autres cations, également pour des raisons électrostatiques. L'auteur propose le critère suivant :

$$5 < F_c/F_a < 10$$

Dans lequel F_c et F_a sont respectivement les forces ioniques du cation et de l'anion

I.7. L'oxyde d'antimoine :

Les oxydes d'antimoine existent sous plusieurs formes, y compris le trioxyde d'antimoine (Sb_2O_3), tétraoxyde d'antimoine (Sb_2O_4) et le pentaoxyde d'antimoine (Sb_2O_5). Parmi ceux-ci, comme c'est le cas Sb_2O_3 soit un cube ou un polymorphe orthorhombique

(communément connu sous le nom sénarmontite et valentinite respectivement), tandis que Sb_2O_4 peut être monoclinique (clinocervantite) ou, plus couramment, orthorhombique (cervantite). Tétroxyde d'antimoine est un composé à valence mixte, contenant à la fois des ions Sb^{3+} et Sb^{5+} dans des proportions égales dans son réseau cristallin [1] et est stable à environ 1000°C [2], la valeur exacte en fonction de l'atmosphère et la méthode de préparation des échantillons. Il est à noter que la structure moléculaire de sénarmontite (Fig. I.2.a) ne semble pas se prêter à la formation du verre par rapport à la structure de la «double-chaîne» de valentinite (Fig. I.2.b), qui peut s'attendre à former le «réseau aléatoire continu» décrit par Zachariasen [4] avec plus de facilité.

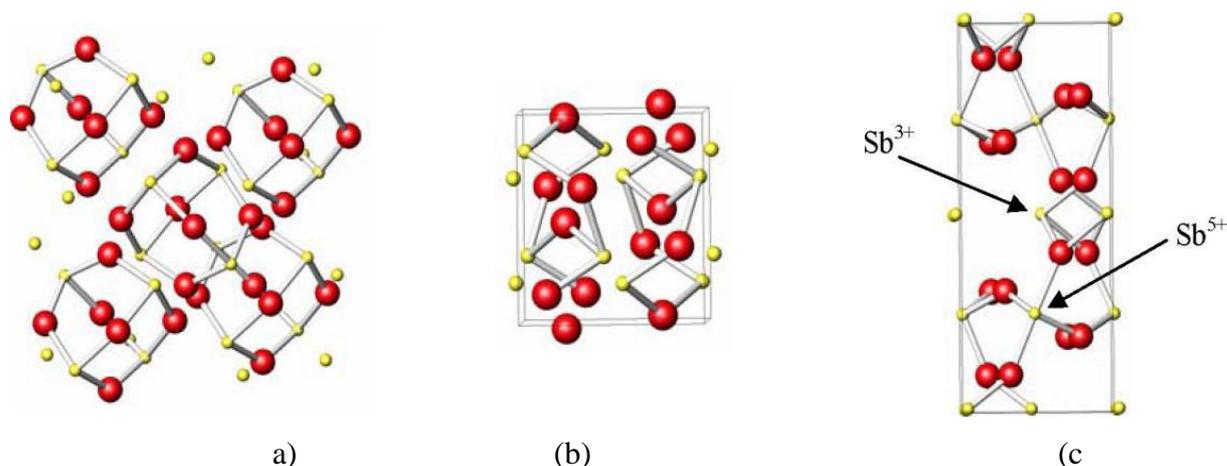


Figure I-2 : la structure de (a) senarmontite, (b) valentinite and, (c) cervantite. Sb^{5+} (cervantite SbO_6) occupe les sites octaédriques.

I.8. Les verres d'oxyde d'antimoine :

En discussion sur la théorie de la formation de verre, en 1932 Zachariasen énumérés Sb_2O_3 et Sb_2O_5 parmi les oxydes qui pourraient donner des verres. [6], en outre, ont suggéré la possibilité de former des verres d'oxydes d'antimoine à partir de Sb_2O_4 [7]. La formation de petites quantités de verre de Sb_2O_3 et de la combinaison $\text{Sb}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ a été rapportée par Kordes en 1939.

Bibliographie:

- [1] [http : www.prisme verre.com/définition.htm](http://www.prisme-verre.com/définition.htm)
- [1] le verre science et technologie James Barton et Claude Guillement
- [2] M. T. Soltani ; thèse de l'université de Biskra.(2005).
- [3] Livre de technologie du verre et céramique Jan Hlavac New York 1983.
- [4] J. Maache, thèse de magister université de Biskra. (2011).
- [5] Phase Transitions in Antimony Oxides and Related Glasses, Robin George Orman, the university of Warwick. Septembre 2005.
- [6] Joseph J. Rothermel, Kuan-Han Sun, Alexander Silverman Journal of the American Ceramic Society Volume 32, Issue 5, pages 153–162, May 1949
- [7] Article antimony oxides glasses walter a. hedden and burnham w. king, Journal of the American ceramic society juin 1956.
- [8] Olivier Villain, Thèse de doctorat de l'université de pierre et marie curie (juin 2009)
- [9] E. Kordes, 2. phys. Chem., 1939, B43,173

Chapitre II :
Synthèse de verres et techniques
expérimentales.

II.1 SYNTHÈSE DES VERRES:

II.1.1 Produits de départ:

Les oxydes de départ qui sont utilisés dans la synthèse des verres ont une pureté minimale de 99%, et ils proviennent de chez Acros, Merk ou Fluka. Les caractérisations physicochimiques des oxydes utilisés sont rassemblées dans le tableau suivant :

Produit de Départ	Masse molaire (g/mol)	Densité (g/cm ³)	Température de fusion (°C)
Sb ₂ O ₃	291.5	5,2(sénarmonite)	656
Li ₂ CO ₃	73.88	13.3g/l	720
WO ₃	231.85	7.2	1473
MoO ₃	143.94	4.692	795

Tableau (II-1):caractéristiques physicochimiques des produits de départ.

II.1.2 Choix de creuset:

Il dépend de la nature des composées utilisées et de leur température de fusion. La synthèse de verre d'oxyde d'antimoine est effectuée dans trois types de creuset.

Creuset en sodocalcique: Ce type des creusets sont utilisés pour des proportions d'oxyde alcalin inférieur à 40% (mol) dans la composition de verre. Ils sont déformés lors de synthèse de verre. La température de ramollissement de ce creuset est voisine de 800°C.

Creuset en silice: Si la fusion du mélange n'est pas atteinte, on fera recoure aux creusets de silice, qui peuvent résistés à température de fusion supérieure à 1200°C.

Creuset en carbone vitreux: Ce type de creusets est utilisé pour les mesures optiques.

Tous nos échantillons de verre ont été synthétisés dans des creusets en sodocalcique; Ils sont déformés lors de la synthèse des verres.

II.1.3 Pesées des compositions du verre :

La pesée des produits de départ a été fixée à 5g. Dans ce travail l'oxyde d'antimoine), l'oxyde de lithium sous forme de carbonate (et l'oxyde de tungstène. Ils sont pesés selon leurs pourcentages stœchiométriques à l'aide d'une balance automatique de type KERN (Figure II .1) . Le mélange est ensuite mis dans des creusets sodo-calcique pour ensuite procéder à la synthèse du verre.



Figure (II-1): Balance KERN .

II.I.3 La fusion des composants de verre :

La fusion du mélange de poudre s'effectue à une température voisinant 1000°C sur une flamme d'un bec benzène. L'oxyde de lithium qui est ajouté sous forme de carbonate donnant lieu a des composés oxydes par dégagement de CO_2 , visible sous forme de fumée après barbotage dans le bain de fusion. La durée de chauffe est environ de 10-12 minutes compté dés la fusion totale du bain - visible à travers le creuset- et avec actionnement de liquide dans le creuset permet l'homogénéisation du fondu et la disparition des bulles d'air visibles et dissolution de toute la poudre collée sur les bords du creuset .



Fig II-2 : Bec benzène à 800°C .

II.I.4 Le coulage :

Le liquide fondu est coulé sur une plaque de laiton préalablement chauffé à une température voisinant la température de transition vitreuse (T_g), suivie instantanément d'un recuit dans une étuve; La durée de chauffe est environ quatre heures à une température égale à $T_g-20^\circ\text{C}$.

II.I.5 Recuit des verres :

Le traitement thermique effectué après obtention du verre permettant l'élimination des contraintes résiduelles est le recuit. Ce procédé a été effectué dans une étuve de type Heraeus (figure II.4). La méthode consiste à réchauffer le verre à une température transition vitreuse (T_g). Le domaine de recuit pendant un temps suffisant (3-4 heure) pour permettre l'élimination des contraintes initialement présentes qui provoquent la fissuration et la fracture du verre .La température et la durée de recuit sont choisies fonction de la température de transition vitreuse du verre utilise.



Figure II.4 : Etuve de type Heraeus.

II.I.6 Polissage de verre :

Le polissage est une opération nécessaire pour pouvoir mesurer différentes propriétés physiques du verre .Ce processus se déroule dans un appareil de polissage de type MINTCH233 (figure II.3). Le polissage des verres se fait par l'utilisation des papiers abrasifs d'une granulométrie graduelle en allant du papier de N° 240 ,800,1800. Les verres polis de cette façon peuvent servir à des caractérisations telles que les modules élasticités, micro dureté.



Figure (II-3): Polisseuse MINTCH233.

II.2 Modules Elastiques:

II.2.1 Définition:

Le verre a été considéré comme un solide élastique c'est-à-dire que lorsqu'on soumet le verre à un effort mécanique dans la limite d'élasticité est complètement réversible [1]. La constante de proportionnalité entre le contrainte appliqué et la déformation est appelé le module.

Selon le type de déformation il y a des différents modules [2]. Les modules élastiques usuels sont généralement: Module de Yong (E), module de rigidité (K), module de cisaillement (G), module longitudinale (L) et coefficient de Poisson (ν).

Sous une contrainte de traction, il apparaît un allongement qui est caractérisé par le module d'élasticité E (module d'Yong).

Si en exerçant une pression sur toutes les faces, cela conduit à une compression, définissant le module de rigidité K .

Une contrainte de cisaillement conduit à un processus de cisaillement. Le module correspondant G a reçu beaucoup de dénomination: module de cisaillement, de glissement et de torsion.

Le module longitudinal L exprime l'allongement de l'échantillon sous l'effet d'une contrainte longitudinale.

Lors de la dilatation, il se produit dans la direction perpendiculaire à l'allongement une contraction transversale. Le rapport entre la contraction transversale relative et l'allongement relatif correspond à un facteur appelé coefficient de Poisson ν .

Chapitre II synthèse de verre et technique expérimentaux

Les modules élastiques E , G , K , ν sont déduits par les vitesses de propagation longitudinales V_L et transversales V_T d'après les expressions suivantes [3]:

Module de Young [G Pa]:
$$E = \rho V_T^2 \frac{3V_L^2 - 4V_T^2}{V_L^2 - V_T^2}$$

Module de cisellement [G Pa]:
$$G = \rho \cdot V_T^2$$

Module longitudinale [G Pa]:
$$L = \rho \cdot V_T^2$$

Module volumique [G Pa]:
$$K = \rho (3V_L^2 - 4V_T^2/3)$$

Coefficient de Poisson:
$$\nu = \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2(V_L^2 - V_T^2)}$$

Module de rigidité
$$\beta = 1/K$$

Ou :

- V_L : est la vitesse de propagation longitudinale [m/s].
- V_T : est la vitesse de propagation transversale [m/s].
- ρ : est la masse volumique [g/cm].

II.2.5.2 Principe expérimental:

On a procédé à la mesure des propriétés élastiques par l'échographie ultrasonore en utilisant un montage dit : Pulse-écho. Cette technique est basée sur la mesure des vitesses de propagation longitudinale V_L et transversale V_T d'une onde ultrasonore dans le matériau étudié. Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques de fréquence situées entre 10KHz et quelques centaines de MHz.

Dans la méthode pulse-écho, les transducteurs piézoélectriques (émetteurs et récepteurs à la fois) génèrent une impulsion mécanique d'excitation de 15 MHz transmise à l'échantillon par l'intermédiaire d'une graisse. Sur l'écran de l'oscilloscope; le signal composé d'une

séquence d'échos d'amplitudes correspondant aux réflexions successives de l'onde ultrasonore sur la face de l'échantillon opposée à celle en contact avec le transducteur. La mesure du ΔT (temps mis par l'onde pour faire un aller-retour entre deux échos successifs) permet de calculer la vitesse de propagation de l'onde à partir de la relation:

$$V = \frac{2e}{\Delta T}$$

Le montage de mesure est composé de:

- ✓ Générateur d'impulsions électriques modèle Olympus NDT 5900PR pulser-receiver opérant dans l'intervalle 1Kh-35MHz.
- ✓ Un Oscilloscope (Lecroy, Wave Runner 104 MXi 1GHz, USA).
- ✓ Transducteurs longitudinale et transversale en quartz opérant à 10 MHz.
- ✓ Résines de couplant pour les deux modes de propagation.

Le transducteur étant accolé au milieu à étudier, l'onde acoustique pénètre et s'y propage. Si la face arrière du milieu à étudier est parallèle à la face d'entrée, on récupère une série d'échos résultants des réflexions multiples de l'onde acoustique incidente. La mesure du retard entre chaque écho permet de déterminer la vitesse de l'onde dans le milieu à étudier si on en connaît l'épaisseur [5].

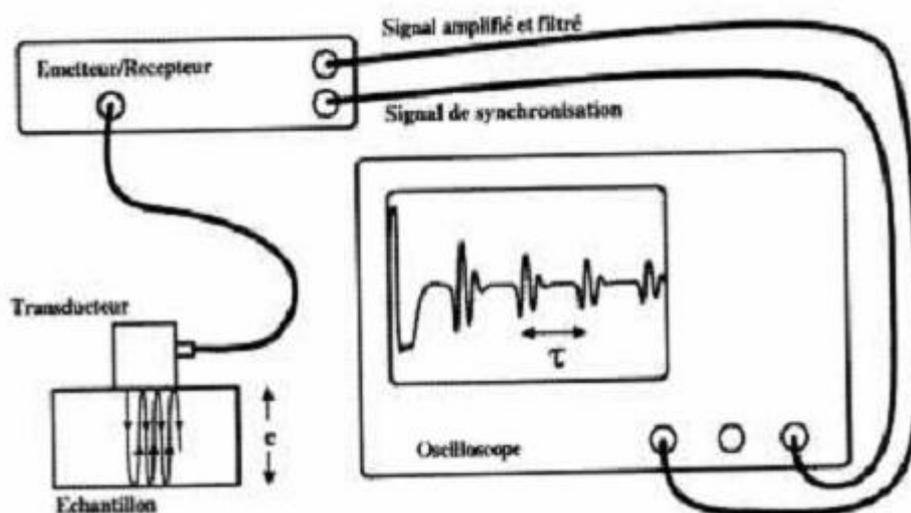


Figure III-17: Technique ultrasonore par réflexion [4].

II.2.3 La microdureté:

II.2.3.1 Définition :

La microdureté est une propriété physique permettant de caractériser la résistance d'un matériau à la pénétration. Dans notre cas on a utilisé la microdureté Vickers. Cet essai est appliqué principalement aux métaux et aux céramiques, mais peut l'être également appliqué aux verres avec de très faible charge.

La mesure de la microdureté Vickers est effectuée avec une pointe de forme d'un

pyramide normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre deux faces opposées égale à 136° . Sous une charge donnée F , durant 10 secondes, l'empreinte obtenue aura une forme carrée; à l'aide d'un microscope on mesure les deux diagonales de l'empreinte d_1 et d_2 . D est la valeur moyenne entre d_1 et d_2 . La dureté Vickers est calculée à l'aide de la formule suivante[5]:

$$H_V = \frac{F}{9.81S} = \frac{2F \sin \frac{\theta}{2}}{9.81d^2} = 0.1891 \frac{F}{d^2}$$

HV: dureté Vickers

d_1, d_2 : les deux diagonales du carré de l'empreinte en [mm].

F : charge d'essai [N].

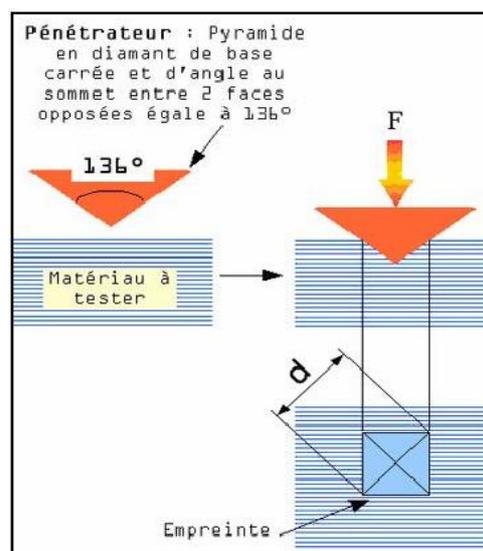


Figure II.7 Essai de dureté Vickers.

Bibliographie :

- [1] Taybi Yasmina, thèse de doctorat université de Annaba .
- [2] Charef khoudja linda, thèse de magister université de Biskra.
- [3] Jenny Le Person, thèse de doctorat de l'université de Renne1.
- [4] M.Hamzaoui ,these doctorat de universite de Biskra.
- [5] A.Ghamri ,mémoire de magister de Biskra (2013).

III.1.Introduction:

Les propriétés physiques des verres dépendent directement de leur structure et de leur composition. Il nous a paru donc essentiel, dans ce chapitre de suivre l'évolution de ces propriétés suivant la composition du verre. Pour en extraire les règles générales, à partir desquelles il est possible d'attribuer à un verre une propriété souhaitée par un simple ajustement de sa composition [1].

III.2. Le domaine vitreux:

D'après les travaux de Soltani et Hamzaoui, ils rapportent l'existence de verres ternaire dans le système $\text{Sb}_2\text{O}_3\text{-Li}_2\text{O-MoO}_3$ (ou WO_3). Les figures (III-1 et 2) montrent le domaine vitreux dans les deux systèmes. La zone vitreuse est très large, et est plus étendue vers les régions riches en oxyde de molybdène ou de tungstène jusqu'à 60 (% mol.) de MoO_3 et 70 (% mol.) [2]. Ces larges domaines expliquent notamment la possibilité de formation des unités structurales formatrices de MoO_3 (ou WO_3).

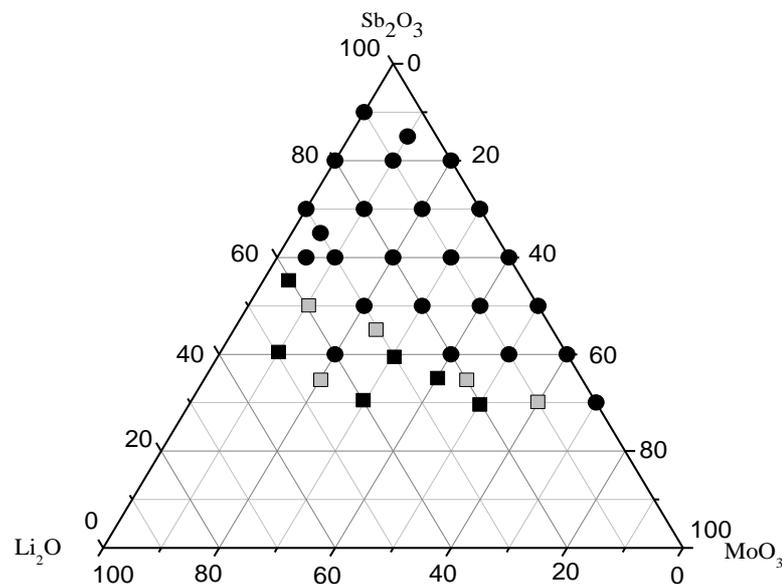


Figure (III-1) : cc[2].

- verre
- vitro-céramique
- Céramique affinage

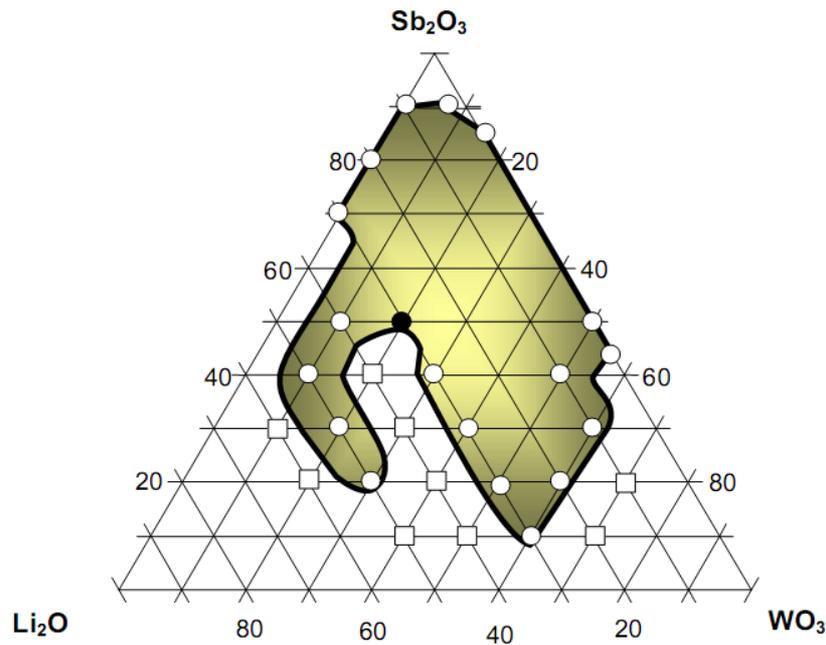


Figure III.2. : Domaine vitreux du système ternaire Sb_2O_3 - Li_2O - WO_3 [3].

Les verres étudiés ont été élaborés dans les deux compositions : $(100-x) \text{Sb}_2\text{O}_3$ - $10 \text{Li}_2\text{O}$ - $x\text{MoO}_3(\text{WO}_3)$. Les verres élaborés ont été choisies de façon à ce que la quantité d'oxyde lithium reste constante (10% mol.) avec insertion équimolaire de MoO_3 (ou WO_3) à la place de Sb_2O_3 , pour voir ainsi le changement des propriétés physiques mesurés tels que les modules élastiques et la micro dureté.

Le taux.

III.3.Résultats et discussions :

III.3.1. Vitesses de propagation des ondes ultrasonores dans les verres:

A l'aide de la technique pulse-écho décrite dans le deuxième chapitre, on peut mesurer les vitesses des ondes longitudinales et transversales de propagation des ultrasons dans les verres ternaires $(100-x)\text{Sb}_2\text{O}_3$ - $10\text{Li}_2\text{O}$ - $x \text{WO}_3$ et $(100-x)\text{Sb}_2\text{O}_3$ - $10\text{Li}_2\text{O}$ - $x\text{MoO}_3$. Ainsi les modules élastiques peuvent être calculés à partir des équations d'élasticité. Tous les résultats obtenus sont rassemblés dans les tableaux suivants :

MoO ₃ (%)	d(mm)	$\rho(\text{g/cm}^3)$	T _L (μs)	T _T (μs)	V _L (m/s)	V _T (m/s)	V _L /V _T
10	2.42	4.78	1.76	3	2750	1613.33	1.70
20	1.96	4.70	1.38	2.36	2840.57	1661.01	1.71
30	2.40	4.57	1.66	2.87	2891.56	1672.47	1.72

Tableau (III-2) : Vitesses de propagation des ondes ultrasonores dans les verres en MoO₃.

WO ₃ (%)	d(mm)	$\rho(\text{g/cm}^3)$	T _L (μs)	T _T (μs)	V _L (m/s)	V _T (m/s)	V _L /V _T
5	1.84	5.21	1.32	2.20	2787.87	1672.72	1.666
10	2.13	5.37	1.48	2.47	2878.37	1724.69	1.668
20	2.08	5.65	1.40	2.35	2971.42	1770.21	1.678
30	2.46	5.91	1.64	2.76	3000	1782.60	1.682

Tableau (III-2) : Vitesses de propagation des ondes ultrasonores dans les verres en WO₃.

III.3.2. Les mesure des vitesses :

Toutes les données de la mesure des vitesses sont rassemblées dans les tableaux (III-1 et 2). Les figures III-2 et III-3, illustrent le comportement des vitesses longitudinales V_L et transversales V_T en fonction de la teneur en WO₃ ou MoO₃.

La première lecture des données mesurées montre que les vitesses de propagation longitudinale transversale augmentent avec l'augmentation de concentration de MoO₃ et WO₃ respectivement. Ainsi, V_L passe de 2787 à 3000m/s pour les verres contenant WO₃ et de 2750 à 2890 m/s pour les verres contenant MoO₃. V_T passe de 1670 à 1780 m/s pour les verres contenant WO₃ et de 1613 à 1670 m/s pour les verres contenant MoO₃. De plus, les verres contenant WO₃ présentent les plus grandes valeurs que celles des verres contenant MoO₃.

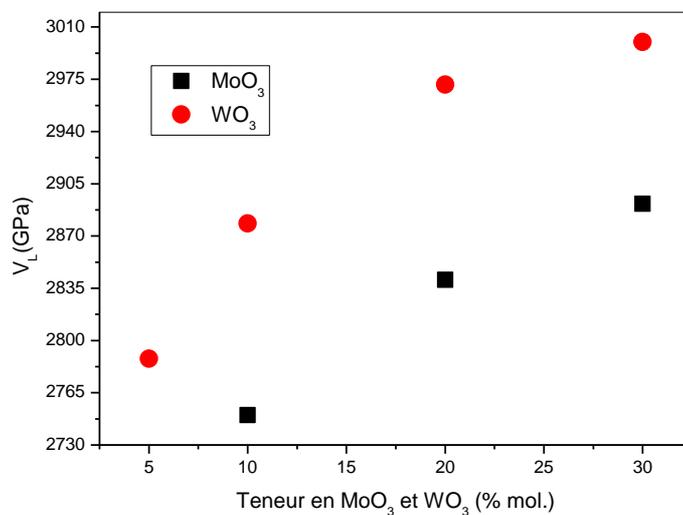


Figure (III-2) : Variation de la vitesse de propagation longitudinale en fonction de la teneur en WO₃ et MoO₃.

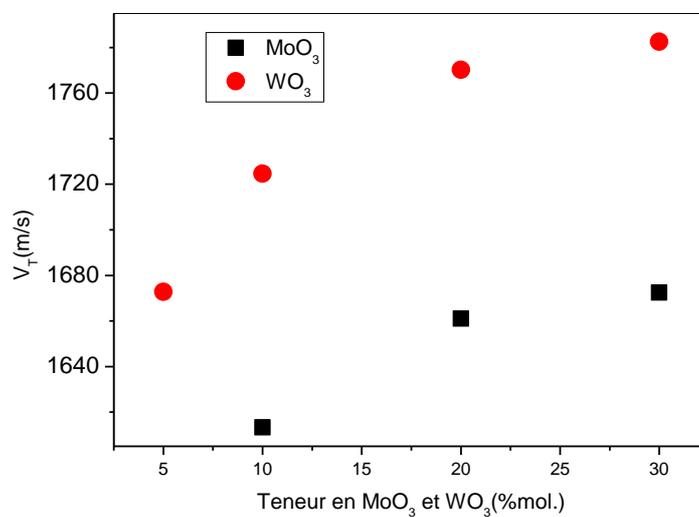


Figure (III-3): Variation de la vitesse de propagation transversale en fonction de la teneur en WO₃ et MoO₃.

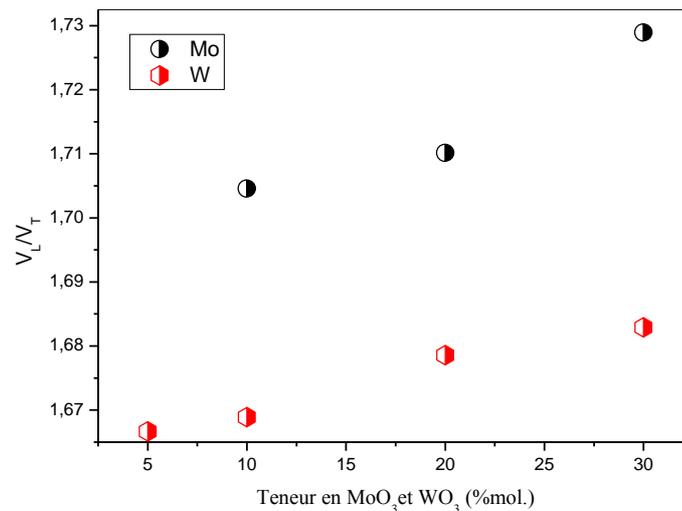


Figure (III-4): Variation de rapport V_L/V_T en fonction de la teneur en WO_3 et MoO_3 .

Les figures III-4, illustrent les variations du rapport V_L/V_T en fonction de la composition du verre. A l'inverse des valeurs des vitesses, V_L/V_T des verres contenant MoO_3 est plus grand que celui des verres contenant WO_3 .

III.4. Interprétation des résultats :

L'augmentation des vitesses ultrasonores peut indiquer qu'il y a une augmentation de la densité d'empilement ou de l'augmentation de la force de liaison interatomique c. a. d. l'espacement entre les atomes. Généralement, les liaisons faibles se font généralement avec des longueurs interatomiques grandes et donc la vitesse de propagation des ondes ultrasonore sera plus lente que pour les fortes forces de liaison.

D'après les figures précédentes, on peut constater V_L et V_T ont une tendance à s'élever avec l'augmentation de la concentration molaire de WO_3 et MoO_3 . D'une part, l'augmentation des vitesses ultrasonores peut indiquer qu'il y a une augmentation de la densité d'empilement ou de l'augmentation de la force de liaison interatomique de l'espacement entre les atomes. Généralement, les liaisons faibles se font généralement avec des longueurs interatomiques grandes et donc la vitesse de propagation des ondes ultrasonore sera plus lente que pour les fortes forces de liaison.

D'autre part, le rapport V_L/V_T pour les deux séries de verres de teneur augmente en augmentant MoO_3 ou WO_3 . Cette augmentation se fait linéairement que ce soit dans V_L ou dans V_T . Cette linéarité suggère une structure vitreuse monotone et l'augmentation du rapport V_L/V_T pourra être lié à l'augmentation du nombre de coordinance et de formation de liaisons Sb-O-W ou Sb-O-Mo. Donc MoO_3 ou WO_3 entrent dans le verre comme un formateur et contribuent à la formation des unités structurales rigides qui, par leurs natures tridimensionnelles, ils contribuent au renforcement de la rigidité du réseau vitreux.

III.5. Mesure les module élastique :

Les mesures des vitesses de propagation longitudinales et transversales permettent de calculer les grandeurs élastiques :

MoO₃(%)	L(GPa)	G(GPa)	K(GPa)	E(GPa)	v(GPa)
10	36.1677	12.4481	19.5702	30.8115	0.2376
20	37.9319	1.297	20.6386	32.1708	0.24021
30	38.2272	1.7887	21.1757	31.9368	0.24864

Tableau (III-3) : Paramètres élastiques dans les verres (100-x)Sb₂O₃-10Li₂O-xMoO₃.

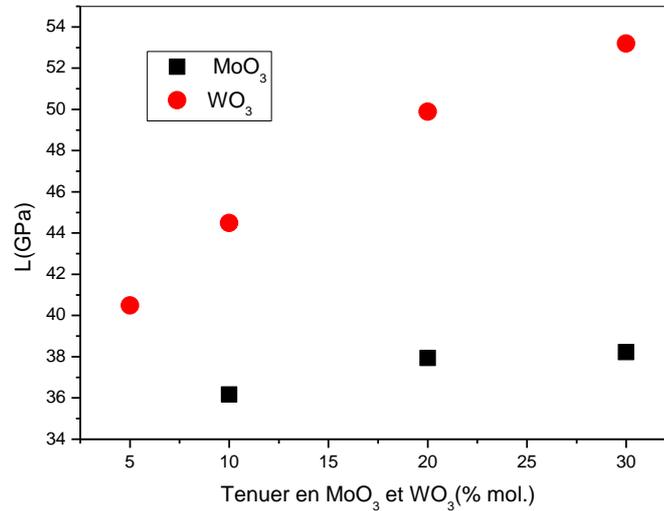
WO₃(%)	L(GPa)	G(GPa)	K(GPa)	E(GPa)	v(GPa)
5	40.4935	14.5777	21.0566	35.5331	0.21875
10	44.4908	15.9735	23.1928	38.9732	0.21993
20	49.886	17.7051	26.2792	43.3745	0.2291
30	53.19	18.7802	28.1498	46.0907	0.22711

Tableau (III-4) : Paramètres élastiques dans les verres (100-x)Sb₂O₃-10Li₂O-xWO₃.

A partir des résultats décrits ci-dessus: la première remarque que peut être observée est l'augmentation des valeurs des modules d'élasticité d'une façon remarquable soit les verres en teneur MoO_3 soit en teneur WO_3 . Par ailleurs, les verres d'oxyde d'antimoine sont classés comme étant des verres tendres lorsqu'ils sont comparés aux verres de silice qui possèdent

des modules élastiques assez élevé : Le module de Young est de 72 GPa [1]. Les valeurs du coefficient de Poisson sont dans les limites des verres $0.20 < \nu < 0.24$.

A partir des résultats décrits ci-dessus on obtient de les figures suivants :



Figure(III-5) : Le module longitudinal en fonction de la teneur en MoO₃ et WO₃.

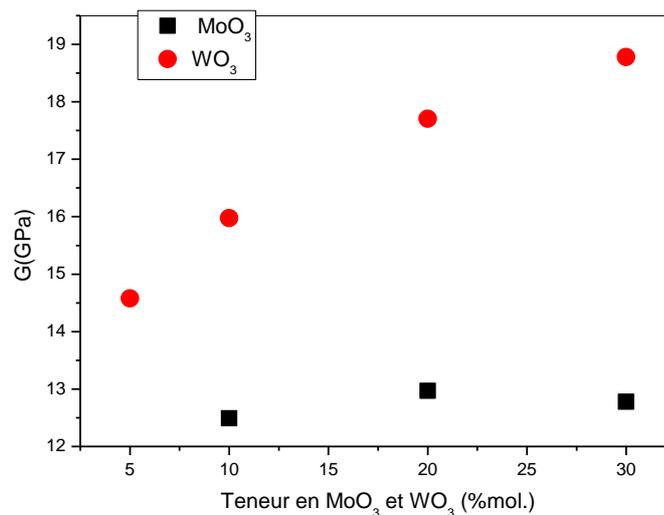


Figure (III-7) : Le module de cisaillement en fonction de la teneur en MoO₃ et WO₃.

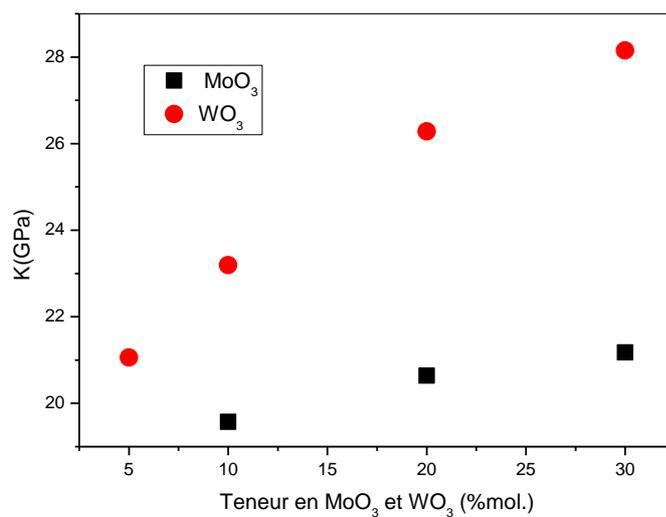


Figure (III-6) : le module de rigidité en fonction de teneur en MoO_3 et WO_3 .

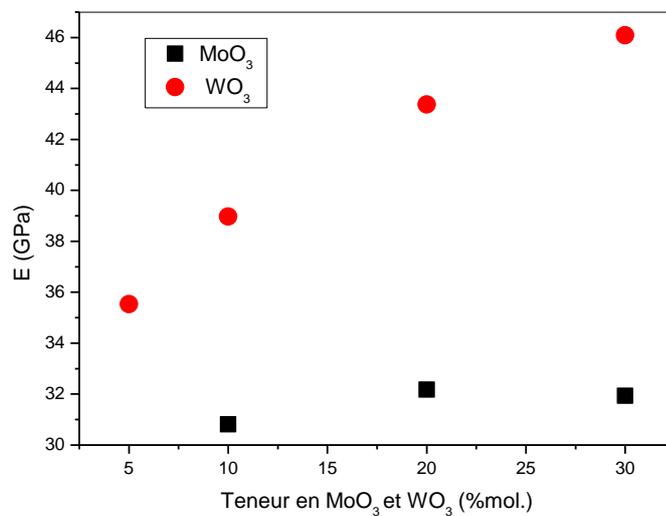


Figure (III-8) : Module d'Young en fonction de teneur en MoO_3 et WO_3 .

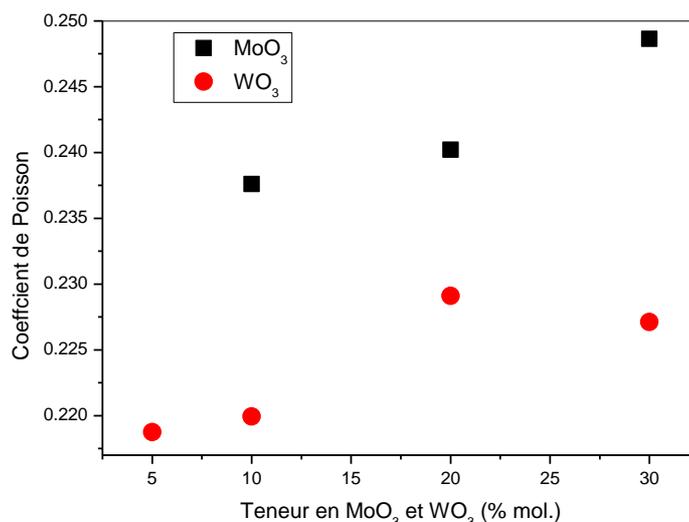


Figure (III-9) : module de Poisson en fonction de teneur en MoO₃ et WO₃.

III.4. Interprétation des modules élastiques :

En générale, le module longitudinal L , reflète les déformations impliquées par la vibration d'élongation de la liaison accompagnée par un changement du volume, ce qui permet L de prendre des valeurs importantes. D'autre part, le module de cisaillement G tient en compte les déformations angulaires des polyèdres de la structure vitreuse, sans changement de volume. Le module volumique K implique une déformation avec un changement de volume.

A partir des figures (III-5 à III-8), on constate que les modules élastiques L , G , K et E augmentent de façon linéaire au fur et à mesure que le taux de WO₃ (ou MoO₃) augmente.

Tous deux les liaisons W-O ou Mo-O sont plus rigides que celle de Sb-O, de plus, le tungstène ou le molybdène ont tous deux la faculté de formés aisément des unités structurales. Ce qui rend la structure vitreuse plus rigides en augmentant les modules élastiques. Par ailleurs il est à noter que les verres contenant WO₃ présentent les modules élastiques plus élevé que ceux de l'oxyde de molybdène.

III.5. Température de Debye :

La température de Debye est un paramètre important dans un solide. Elle est exprimée pour décrire les propriétés résultant des vibrations atomiques [4]. Dans le modèle de Debye, T_D représente tous les modes de vibration (acoustique et optique). La relation (a) représente la température de Debye acoustique, qui est calculable à partir de la connaissance de la vitesse moyenne de propagation du son dans le verre.

L'accroissement de la valeur de la température de Debye implique une augmentation de la rigidité du système de verre [5].

$$\theta_D = \frac{h}{k} \left(\frac{3PN_a}{4\pi V_a} \right)^{1/3} \cdot V_s ({}^0\text{K}) \dots \dots \dots (a).$$

Ou

- **h** : est la constante de Planck,
- **k**: constante de Boltzmann.
- **p**: Nombre d'atomes de la composition chimique.
- **Na**: Nombre d'Avogadro.
- **Va**: Volume molaire.
- **Vs** : représente la vitesse moyenne de propagation des ondes sonores dans un matériau. Elle est calculée selon la formule :

$$V_s = \left(\frac{1}{3} \left(\frac{2}{V_T^3} + \frac{1}{V_L^3} \right) \right)^{-1/3} (\text{m/s}) \dots \dots \dots (b)$$

Les tableaux suivants représentent toutes les données requises pour calculer la température de Debye.

MoO ₃ (%)	P	V _S	M _a	V _a	T _D (°k)
10	4.7	1789	250.5	52.37	199.5
20	4.6	1845	235.7	50.15	207.24
30	4.5	1858.7	221.03	48.34	209.8

Tableau (III-5) : valeurs de Températures de Debye des verres (100-x)Sb₂O₃-10Li₂O-xMoO₃.

WO ₃ (%)	P	V _S	M _a	V _a	T _D (°K)
5	4.75	1850	395.84	48.29	208.1
10	4.7	1908.4	259.3	50.34	216.9
20	4.6	1960.7	253.39	44.84	226.8
30	4.5	1973.8	247.45	41.87	231.8

Tableau (III-6) : valeurs Température de Debye des verres (100-x)Sb₂O₃-10Li₂O-xWO₃.

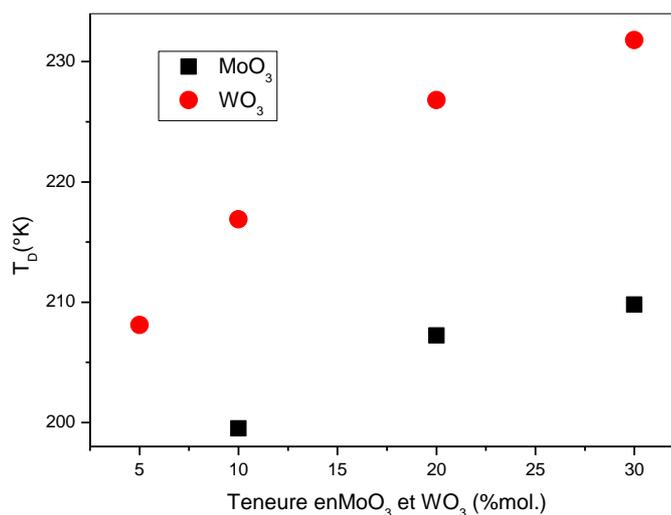


Figure (III-10): Température de Debye en fonction de teneur MoO₃ et WO₃.

On constate que la température de Debye augmente dans les deux séries de verres. A partir des valeurs de la température de Debye, on remarque que le comportement de la variation de θ_D est pratiquement le même dans les deux série de verres. Une augmentation assez nette de θ_D pourra être due à l'augmentation de la vitesse moyenne V_s du son dans le verre.

III.6. Microdureté:

Les mesures de la micro dureté ont été effectuées à l'aide d'un microduremètre. On a appliqué une très faible charge de 25g, pendant une durée de 10s. Une valeur moyenne de dureté Vickers est calculée à partir de 5 mesures faite sur des échantillons de verres ayant des surfaces très bien polis et donc parfaitement planes. Comme précédemment, la substitution de Sb_2O_3 par WO_3 rend le verre plus dur. Cela pourra bien se traduire par l'insertion des unités structurales $[WO_4]$ ou $[WO_6]$ de coordinences 4 ou 6 plus que les unités structurales $[SbO_3]$ de l'oxyde de l'antimoine.[1]

Les résultats sont rassemblés dans le tableau suivant:

WO₃(% mol.)	Micro dureté (kg/mm²)
5	198.4
10	210.6
20	228.6
30	253.5
MoO₃(% mol.)	
10	211.4
20	208.9
30	205.5

Tableau (III-7): Résultats de micro dureté dans les verres du système



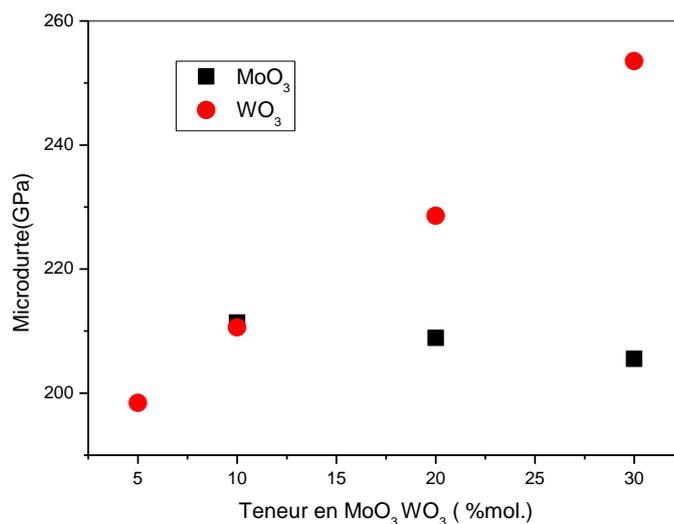


Figure (III-11): Micro dureté en fonction de teneur MoO_3 et WO_3 .

On constate que Micro dureté augmente linéairement en fonction de teneur et WO_3 , par contre on remarque une légère diminution dans les verres contenant MoO_3 .

Ce comportement est similaire aux résultats des modules élastiques. Cela met en évidence une bonne cohérence et la légitimité de nos résultats.

Bibliographie

- [1] H.Guezoun, mémoire de magister de l'université de Ouargla (2012).
- [2] M. Hamzaoui, Thèse de doctorat de l'université de Biskra (2013) .
- [3] N. W.Ascroft, N. D. Mermin, Sol. State Phys., Holt-Saunders International Editions (1976).
- [4] J.M. Farley, G.A. Saunders, Phys. Stat. Sol., 28 (a) (1975) 199.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

Conclusion Ce mémoire a été consacré à l'étude de verre à base d'oxyde d'antimoine dans le système ternaire $\text{Sb}_2\text{O}_3\text{-Li}_2\text{O-WO}_3$ (MoO_3), ces verres à été synthétisés au laboratoire pédagogique de l'université de Biskra. Nous avons élaboré des échantillons dans la ligne qui contient 10% mole de Li_2O et nous avons fait le changement entre l'oxyde de molybdène et l'oxyde de tungstène selon les compositions suivantes :

- $(100\text{-X})\text{Sb}_2\text{O}_3\text{-}10\text{Li}_2\text{O-X MoO}_3$, ($X=10, 20, 30$).
- $(100\text{-X})\text{Sb}_2\text{O}_3\text{-}10\text{Li}_2\text{O-X WO}_3$, ($X=5, 10, 20, 30$).

Les propriétés mécaniques et élastiques sont fortement corrélées à la composition

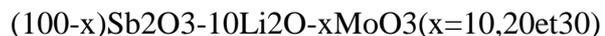
vitreuse. Les valeurs des modules élastiques de longitudinal, Young et rigidité augmente lorsque la teneur d'oxyde de Molybdène et Tungstène augmente respectivement, et le module de cisaillement et Poisson augmente lentement, part contre la microdureté augmente lorsque la teneur d'oxyde de Tungstène augmente, et diminue lorsque la teneur d'oxyde Molybdène augmente.

L'étude de propriétés mécaniques et élastique avait confirmé que l'addition de WO_3 donne une structure plus rigide (les valeurs de la micro dureté), d'autre part, les résultats des modules élastiques supposent une variation de la structure des verres d'oxyde d'antimoine.

Ces résultats ouvrent la voie à plusieurs applications de ces verres ou les vitrocéramiques qui en dérivent à leur aptitude à une matrice hôte pour les matériaux laser opérant dans le domaine optique.

ملخص:

في هذا العمل قمنا بتحضير عينات الزجاج ذات النظام الثلاثي بالطريقة الكلاسيكية



الهدف من هذا العمل هو قياس الخصائص الميكانيكية والمرونية في الزجاج بقاعدة أكسيد الانتيموان وملاحظة مدى تأثير إضافة WO_3 او MoO_3 .

تمت قياسات المرونة بطريقة pulse-écho و القياسات الميكانيكية (الصلادة) بجهاز ميكروديرمتر .

إضافة أكسيد التنغستان والمولبيدات يزيد من معاملات المرونة E (46.90 و 31.93) على الترتيب .

قيم معامل بواسن تاكد الدور البنوي المزدوج لأكسيد التنغستان في الزجاج بالوحدة [WO4] et [WO6] .

Résumé:

Dans ce travail, des verres dans le système ternaire $(100-x)\text{Sb}_2\text{O}_3-10\text{Li}_2\text{O}-x\text{WO}_3(x=5, 10, 20, \text{et}30\text{mol}\%)$ et $(100-x)\text{Sb}_2\text{O}_3-10\text{Li}_2\text{O}-x\text{WO}_3(x=10, 20\text{et}30\text{mol}\%)$ ont été élaborés par l'utilisation du procédé classique d'élaboration de verre.

Le but de ce travail mesure des propriétés mécaniques et élastiques sur les verres a base d'oxyde d antimoine et voir surtout l'effet de substitution de la WO_3 ou MoO_3 a la place de d'oxyde d'antimoine sur ces propriétés.

Les mesures a été faite élastiques par la méthode pulse-écho et la microdurte par microdurmetre.

La substitution de Sb_2O_3 par WO_3 ou MoO_3 augmente les modules d'élasticité (E est au alentour de 46.09 GPa et 31.93GPa) respectivement, les valeurs du coefficient de Poisson implique que l'oxyde de tungstène joue les deux rôles structurales dans le verre par les unités [WO4] et [WO6].