

# جامعة قاصدي مرباح ورقلة

كلية الرياضيات وعلوم المادة

قسم علوم المادة

رقم الترتيب

.....:



مذكرة: ماستر أكاديمي

المجال:

فرع : فيزياء

تخصص: المواد

من إعداد الطالب :مهيري سبتي

**الموضوع:**

## العلاقة بين درجة حرارة التحول الزجاجي ومختلف المعاملات المرونية لزجاج هالوجينوفوسفاتي

نوقشت يوم: 2016/05/24

أمام لجنة المناقشة المكونة من:

رئيسا	جامعة ورقلة	أ. محاضر	• بن مبروك لزهر
ممتحنا	جامعة ورقلة	أ. تعليم عالي	• عيادي كمال الدين
مقررا	جامعة ورقلة	أ. محاضر	• بن طويلة عمر

السنة الجامعية: 2016/2015

## الإهداء

اهدي ثمرة عملي هذا

إلى من ربّتي وأنارت دربي وأعانتني بالصلوات والدعوات، إلى أغلى إنسان في هذا الوجود أُمي  
الحبيبة أسال الله أن يوفّقني لبرها.

إلى والدي الكريم أسال الله أن يوفّقني لبره.

إلى رفيقة دربي زوجتي وإلى أولادي محمد عبد الحق، أحمد يس، أنس، عبد الله عزام، فاطمة  
وجميع إخوتي وإخواتي الأعزاء مصطفى، إبراهيم، صليحة، نعيمة .

إلى أستاذي الفاضل عمر بن طويلة الذي كان لي بمثابة النبراس الذي أنار لي هذا الدرب،  
الذي لم يبخل علي بالنصح والإرشاد والتوجيه والتشجيع.

إلى أخواني الذين لم يبخلوا علي بالكلمة الطيبة والدعم المعنوي بشكي جمال، بشكي  
لزهر، دويس السعيد ، بوعكة محمد عبد الكريم وحنونة محمد العيد.

إلى كل الزملاء والزميلات تخصص فيزياء المواد والإشعاعية اذكر منهم  
سلمان، صالح، شاوش، بالنور، عرفة،... وحجاج، بخوش،...

إلى جنود الخفاء الذين ساعدوني بدون أن اطلب منهم ذلك.  
إلى جميع الأصدقاء والزملاء في كل مكان وزمان.

## شكر و عرفان

الحمد لله الذي أنار لنا درب العلم والمعرفة وأعانني على أداء هذا الواجب ووفقني إلى انجاز هذا العمل

اتوجه بجزيل الشكر والامتنان إلى الأستاذ المشرف الدكتور عمر بن طويلة الذي لم يبخل علي بتوجيهاته ونصائحه القيمة التي كانت عوناً لي في إتمام هذا البحث. الشكر موصول إلى أعضاء لجنة المناقشة الأستاذ الدكتور عيادي كمال الدين والأستاذ الدكتور بن مبروك لزهري على قبولهم مناقشة هذا العمل وجهودهم المبذولة لتقييم هذا العمل.

واشكر كل من ساعدني من قريب أو من بعيد على انجاز هذا العمل وفي تذليل ما واجهته من صعوبات.

ويطيب لي أن أتقدم بالشكر أيضاً والتقدير إلى أساتذتي بتخصص ماستر فيزياء المواد داودي باحمد، محمدي لزهري، غرياني رشيد، تجاني محمد الخامس ، بلعكروم كريمة والأستاذ محاوشي عز الدين، على تكوينهم ومرافقتهم لنا طيلة مسار الماستر. كما لا أنسى الأستاذة نعيمة التي لم تبخل علينا بنصائحها والشكر موصول أيضاً إلى جميع الموظفين بإدارة قسم علوم المادة.

أيضاً الشكر موصول إلى السيد حكوم محمد ، بوزيد عبد المالك ، بوزيد اسماعيل ، بلهادي ، عبد الكريم



## فهرس المحتويات

/	الاهداء	
/	شكر و عرفان	
/	فهرس المحتويات	
/	فهرس الاشكال	
/	فهرس الجداول	
أ	مقدمة عامة	
<b>الفصل الاول : عموميات حول الزجاج، بنيته و أهم خواصه</b>		
02	تمهيد	1
02	لمحة تاريخية عن الزجاج	2
03	حالات المادة	3
03	المواد الصلبة البلورية	1-3
03	المواد الصلبة غير البلورية	2-3
03	تعريف الزجاج	4
04	الحالة الزجاجية	5
04	بنية الزجاج	6
05	بنية الزجاج البسيط	1-6
06	بنية الزجاج المركب	2-6
06	أنواع الزجاج	7
07	الزجاج الأكسيدي <i>Les verres d'oxydes</i>	1-7
07	الزجاج الهالوجيني <i>Les verres d'halogénures</i>	2-7
07	الزجاج الكالكوجيني <i>Les verres de chalcogénures</i>	3-7
08	خصائص الزجاج	8
08	الخواص الضوئية	1-8
09	الخواص الحرارية	2-8
10	الخواص الكهربائية	3-8
10	الخواص الميكانيكية	4-8
11	خاتمة الفصل الاول	9
<b>الفصل الثاني : الخصائص المرونية للزجاج</b>		
13	تمهيد	1
13	نظرية المرونة	2
13	وصف خصائص المرونة من المواد الصلبة	1-2
15	المعاملات المرونية <i>Modules Elastiques</i>	2-2
17	الخصائص المرنة للجسم الصلب	3
17	الاختبارات الميكانيكية	4
18	الاختبار الاتلافي	1-4
18	الاختبار اللاتلافي	2-4

18	اختبارات الامواج فوق الصوتية (Ultrasonic Testing UT)	1-2-
19	الطرق التجريبية لتعيين المعاملات المرنة للزجاج	5
19	طريقة الامواج فوق الصوتية	1-5
20	نظرية القياس بالموجات فوق الصوتية	1-1-5
21	تحديد درجة حرارة ديباي	6
21	نظرية ديباي لحساب الحرارة النوعية	1-6
28	خاتمة الفصل الثاني	7
<b>الفصل الثالث : العلاقات بين مختلف المعاملات المرنة وكذا درجة حرارة التحول الزجاجي للزجاج الهالوجينوفوسفاتي</b>		
30	تمهيد	1
30	العينات المدروسة	2
30	تعيين درجة التحول الزجاجي	3
30	تقنية التحليل باستخدام مسعر المسح الحراري التبايني (DSC)	1-3
33	نتائج قياسات درجة حرارة التحول الزجاجي	2-3
34	تعيين مختلف معاملات المرونة	4
34	قياس سرعات الصوت الطولية والعرضية بواسطة القياسات فوق الصوتية	1-4
35	المعاملات المرنة	2-4
35	العلاقة بين معامل يونغ E و المعامل العرضي (G) للزجاج الهالوجينوفوسفاتي	1-2-4
36	العلاقة بين المعامل الجسمي K و المعامل العرضي (G) للزجاج الهالوجينوفوسفاتي (علاقة كوشي)	2-2-4
37	نسبة بواسون	3-2-4
38	العلاقة بين معامل يونغ E والكثافة ( $\rho$ ) للزجاج الهالوجينوفوسفاتي	4-2-4
38	العلاقة بين معامل يونغ E والصلادة H	5-2-4
39	العلاقة بين درجة حرارة التحول الزجاجي Tg و معامل المرونة E	6-2-4
39	العلاقة بين درجة حرارة التحول الزجاجي Tg و المعامل العرضي G	7-2-4
40	العلاقة بين درجة حرارة التحول الزجاجي Tg و درجة حرارة ديباي $\theta_d$	8-2-4
41	خاتمة الفصل الثالث	5
42	الخلاصة العامة	
44	المراجع	

## فهرس الاشكال

03	تمثيل مبسط: (a) مادة بلورية - (b) مادة لابلورية [3].	الشكل (1.I)
04	ظاهرة الانتقال الزجاجي	الشكل (2.I)
05	مجال استقرار متعددات الوجوه تبعا لقيمة النسبة بين نصفَي قطري الشاردتين السالبة و الموجبة $(R_C / R_A)$ .	الشكل (3.I)
08	مجال شفافية مختلف انواع الزجاج	الشكل (4.I)
18	يوضح الاختبارات الاتلافية	الشكل (1.II)
19	رسوم توضيحي لطريقة الموجات فوق الصوتية	الشكل (2.II)
21	بعض من الموجات المستعرضة في اتجاه واحد لبلورة	الشكل (3.II)
22	الكثافة $g(v)$ في تقريب ديماى وأينشتين	الشكل (4.II)
33	طريقة المماسات في الحصول على درجة التحول الزجاجي من منحنى مسعر المسح التبايني	الشكل (1.III)
33	المنحنى الناتج عن مسعر المسح التبايني	الشكل (2.III)
33	تحديد قيمة درجة حرارة التحول الزجاجي Tg من المنحنى الناتج عن مسعر المسح التبايني	الشكل (3.III)
36	علاقة بين K و المعامل العرضي G ( علاقة كوشي )	الشكل (4-III)
37	تغير نسبة بواسون بدلالة الانحراف عن علاقة كوشي	شكل (5-III)

## فهرس الجداول

34	سرعات الصوت الطولية والعرضية والنسبة بينهما لمختلف العينات	الجدول(1.III)
35	قيم معامل يونغ E و المعامل العرضي (G) للزجاج الهالوجينوفوسفاتي و النسبة E/G	الجدول 2.III
38	العلاقة بين معامل يونغ E و الكثافة ( $\rho$ ) للزجاج الهالوجينوفوسفاتي	الجدول 3.III
38	العلاقة بين معامل يونغ E و الصلادة (H) للزجاج الهالوجينوفوسفاتي	الجدول 4.III
39	العلاقة بين معامل يونغ E و درجة حرارة التحول الزجاجي ( <b>Tg</b> ) للزجاج الهالوجينوفوسفاتي	الجدول 5.III
39	العلاقة بين درجة حرارة التحول الزجاجي Tg و المعامل العرضي G	الجدول 6.III
40	العلاقة بين درجة حرارة التحول الزجاجي Tg و درجة حرارة ديباي $\theta_d$	الجدول 7.III

عالمه

معلمه



# مقدمة عامة

## مقدمة عامة

الزجاج من المواد المهمة في حياتنا اليومية، ويستعمل في كثير من المجالات منذ القدم، حيث تم استخدامه في صناعة الأواني المفيدة والمواد الزخرفية ومواد الزينة بما في ذلك المجوهرات. الزجاج يعتبر أساس العديد من الصناعات إذ يستخدم حاليا في مختلف التركيبات الضوئية والطبية والعلمية والصناعية.

أصبح للزجاج تكنولوجيا عالية جعلت منه منتجا لا يمكن الاستغناء عنه في أي مجال، فالزجاج هو ذلك الجسم الصلب الذي يختص بعدد من السمات المميزة التي تأتي من خصوصية بنيته و لا تجتمع في غيره من المواد، و لا تزال الابحاث تنشط للتعلم في فهم بنية الزجاج و سلوكه الترموديناميكي و خواصه البصرية.

و يتم استخدام الزجاج في التركيبات الضوئية، التي هي عبارة عن زجاج مطعم بكميات من أيونات الترابية النادرة، تتميز هذه الأيونات بعدد من الخصائص البصرية المهمة، و تستخدم كوسط فعال في العديد من المواد الصلبة نظرا لانتقالاتها الضوئية العديدة في ظل العديد من التحولات الاشعاعية في المجال المرئي و الاشعة تحت الحمراء. كما يستخدم في الكثير من المجالات الهندسية والتقنية، إذا يدخل في المباني وفي صناعة السيارات والهواتف الذكية وشاشات العرض ... إلخ. تعدد استعمالات الزجاج تفرض علينا معرفة مدى صلاحيته لها وذلك عن طريق تحديد مختلف خصائصه: البنيوية، الميكانيكية، الضوئية، الكيميائية ... إلخ.

الهدف من هذه المذكرة هو محاولة إيجاد علاقة بين مختلف المعاملات المرونية لزجاج هالوجينوفوسفاتي.

نظمتنا هذه الدراسة في ثلاثة فصول:

**الفصل الأول:** يضم هذا الفصل عموميات حول الزجاج، بنيته و أهم خواصه.

**الفصل الثاني:** يهدف هذا الفصل الى معرفة الخصائص المرونية للزجاج .

**الفصل الثالث:** يعالج العلاقات بين مختلف المعاملات المرونية وكذا درجة حرارة التحول الزجاجي لزجاج هالوجينوفوسفاتي

# الفصل الأول:

أساسيات الزواج وأنواعه وخصائصه وسلوكه

## 1.I. تمهيد

الزجاج، الذي استخدم من طرف الإنسان منذ آلاف السنين، يعد من المواد المهمة والقيمة حيث أخذ احتلّ، ولا يزال مكانا كبيرا في المجال العلمي والتقني. إن تحسين الزجاج و العمل على تطويره أخذ حيزا كبيرا من الإهتمام، حيث تعمل البحوث والتطبيقات الجديدة على تحسين بنية الزجاج. و يظهر ان الزجاج لا يزال مادة كبيرة الحداثة وله مستقبل عظيم. سنتطرق في هذا الفصل إلى أساسيات الزجاج وأنواعه وخصائصه وسلوكه.

## 2.I. لمحة تاريخية عن الزجاج

يعود تاريخ صناعة الزجاج إلى عام 2000 قبل الميلاد. ومنذ ذلك الحين، دخل الزجاج في أغراض عديدة من حياة الإنسان اليومية. فتم استخدامه في صناعة الأواني المفيدة والمواد الخزفية ومواد الزينة بما في ذلك المجوهرات. كما كان له تطبيقاته الصناعية والمعمارية. ولقد كانت أقدم المواد الزجاجية عبارة عن خزرات حيث لم يتم التوصل إلى الآنية المخوفة حتى عام 1500 قبل الميلاد. ويعتبر الصناع الآسيويون هم أول من أرسى صناعة الزجاج، ومنهم انتقلت الصناعة إلى مصر حيث ترجع أول آنية زجاجية إلى حكم تحتمس الثالث (1504-1450 قبل الميلاد)[1].

وقد ظلت صناعة الزجاج منتعشة في مصر حتى حوالي عام 1200 قبل الميلاد ثم توقفت فعليا لعدة قرون من الزمان. وفي القرن التاسع قبل الميلاد، ظهرت كل من سوريا والعراق كمراكز لصناعة الزجاج، وامتدت الصناعة عبر منطقة البحر المتوسط. وفي العصر الإغريقي، و عرفت مصر بالدور الرئيسي في تزويد القصور الملكية بالزجاج الفخم. وفي القرن الأول قبل الميلاد، تم التوصل إلى عملية نفخ الزجاج في سواحل فينيقيا. وفي العصر الروماني، كانت صناعة الزجاج منتشرة في مناطق متعددة من الإمبراطورية الرومانية. وابتكر المسلمون التزجيج، وما زالت روائع من أعمالهم في التزجيج باقية في واجهات المساجد والجوامع، وكذلك في الأبنية الأثرية إضافة إلى ما هو محفوظ في المتاحف العالمية. ولقد استخدمت الأصباغ المعدنية في هذه الصناعة الفنية، فلم تتأثر بالتقلبات الجوية، ولم تؤثر فيها حرارة الشمس المحرقة طوال مئات السنين الماضية. وعرف علماء المسلمين البلور وهو الزجاج الممتاز الذي يحتوي على نسب مختلفة من أكاسيد الرصاص، وصنعوه بإتقان، وما زال يستعمل في صناعة الأقداح والأواني والثريات، وكذلك في صناعة الخواتم وأدوات الزينة وكثير من الأدوات المنزلية. وصنعوا منه نظارات العيون، ومن العالم الإسلامي انتقلت صناعة الزجاج إلى أوروبا وقد تجمعت أسرار هذه الصناعة مع الفنيين في فينسيا واحتكرت صناعة الزجاج في أوروبا حتى القرن السابع عشر عندما علمت فرنسا بالتقنيات المطلوبة وأسرارها، وانتقلت إليها صناعة الزجاج وأصبحت أهم مراكزها في العالم وشهدت الفترة الممتدة بين

1950م 1960م ازدهارا حقيقيا لعلم الزجاج مقارنة بما عرفه علم التعدين (المعادن) قبله بعشرات السنين، خلال العشرينات الأخيرة، صنف الزجاج ضمن المواد ذات التطبيقات الدقيقة، عالية التخصص، في التقنيات الالكترونية أو البصرية (LASER)، وقد شهد حاليا مجالا جديدا واعداد بعد ضبط واستعمال النواقل الفوتونية في مجال الاتصالات، كما عرف سريعا بأن الزجاج يمكن اعتباره كوسط حقيقي لتفاعلات شتى، وهكذا استمر الزجاج في جلب حلول أصيلة لهذه التقنيات الجديدة [1].

### 3.I. حالات المادة

يمكن تصنيف حالات المادة في الطبيعة إلى أربعة حالات: سائلة، غازية، بلازمية و صلبة.

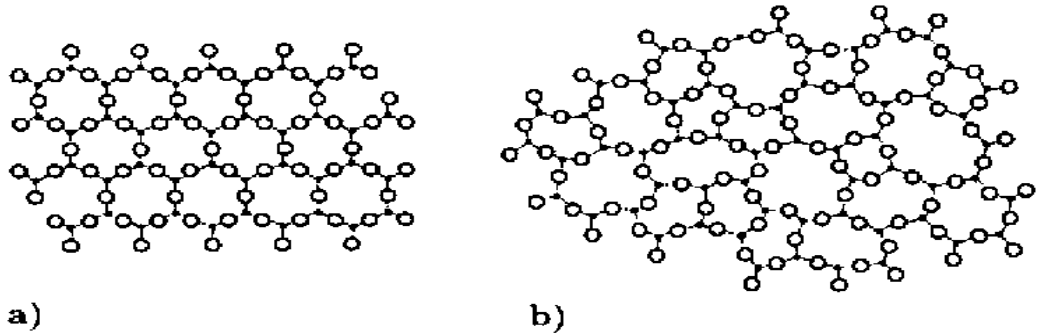
و تنقسم الحالة الصلبة إلى قسمين أساسيين [2]:

#### • المواد الصلبة البلورية:

المواد الصلبة البلورية تكون ذراتها منتظمة بشكل دوري و تتميز بترتيب ذري منتظم طويل المدى [2].

#### • المواد الصلبة غير البلورية:

تكون ذراتها بشكل عشوائي و تتميز بترتيب ذري قصير المدى و تضم كل من المواد عديمة البنية (Amorphe) [2].



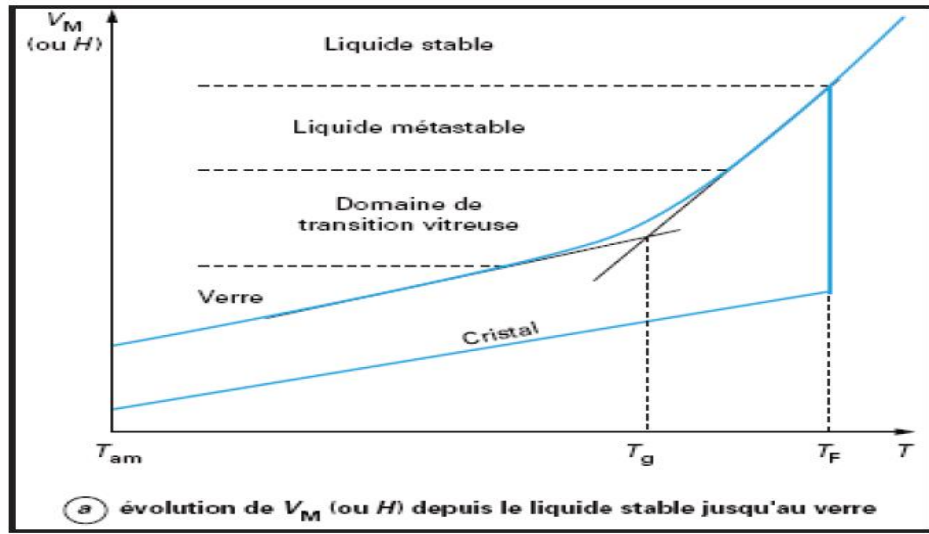
الشكل (1.I): تمثيل مبسط: (a) مادة بلورية - (b) مادة لا بلورية [3].

### 4.I. تعريف الزجاج

الزجاج هو جسم صلب لا بلوري يتميز بظاهرة الإنتقالات الزجاجية، و الحالة الفيزيائية الموافقة هي الحالة الزجاجية [2].

## 5.I. الحالة الزجاجية états vitreux :

تتميز هذه الحالة بحدوث ظاهرة الانتقالات الزجاجية و التي يتم فيها الانتقال من الطور السائل اللزج إلى الطور الزجاجي . فعندما نقوم بتبريد سائل لزج زجاجي تبريدا سريعا و متواصل يحدث له تقلص تناقص في الحجم مع انخفاض درجة الحرارة حتى تصبح اقل من درجة حرارة الانصهار. فكلما انخفضت درجة الحرارة ارتفعت نسبة اللزوجة و يبدأ السائل في التصلب إلى أن يتحول إلى بلورة. و بمواصلة عملية التبريد و انخفاض درجة الحرارة يثبت الحجم و عندها تسمى درجة الحرارة بدرجة حرارة الانتقال الزجاجي  $T_g$  [3].



الشكل (2.I): ظاهرة الانتقال الزجاجي

## 6.I. بنية الزجاج

وضعت عدة فرضيات من اجل دراسة بنية الزجاج و ذلك منذ بداية القرن العشرين من بينها النظرية البلورية التي طورت من طرف مجموعة من العلماء Lebedev ثم Valenkov ثم Porai-Koshitz و تنص هذه النظرية على ان الزجاج يتشكل من العديد من المجالات الذرية الصغيرة و المرتبة تسمى البلورات.

أما النظرية الثانية التي وضعت من طرف Zachariazen سنة 1932 " نموذج الشبكة العشوائية " تنص على أن عدم وجود مجالات ذرية مرتبة، بل تعتمد بنية الزجاج على طبيعة و نسبة الأكاسيد المكونة له [4].

و تنقسم بنية الزجاج إلى قسمين:





- (أ) عدد ذرات الأكسجين المحيطة بالشاردة السالبة A يجب أن يكون صغيرا.
- (ب) أي ذرة أكسجين لا يجب أن ترتبط بأكثر من شاردين موجبتين.
- (ج) يمكن أن تشترك متعددات الأوجه في الرؤوس و لكن لا يمكن أن تكون لها أوجه مشتركة.
- (د) على الأقل ثلاثة رؤوس لكل متعدد أوجه تكون مشتركة مع متعددات سطوح أخرى [5].

### 2.6.I. بنية الزجاج المركب:

الزجاج المركب يتكون من أكسيدين فأكثر من الأكاسيد البسيطة و تصنف هذه الأكاسيد من حيث وظائفها في الشبكة الزجاجية إلى ما يلي [6]:

#### ■ الأكاسيد المشكلة للبنية الزجاجية *les oxydes formateurs* :

و هي الأكاسيد التي تشكل البنية القاعدية للشبكة الزجاجية و تتميز هذه الأكاسيد بطاقة ربط كبيرة و درجة حرارة ذوبان عالية جدا [6].

#### ■ الأكاسيد المغيرة للبنية الزجاجية *les oxydes modificateurs* :

هي الأكاسيد المغيرة في الشبكة الزجاجية، حيث تضاف هذه الأكاسيد للتركيب الأولية للزجاج و ذلك للحصول على خصائص فيزيوكيميائية، و هي أكاسيد قلوية أو قلوية ترابية [6].

#### ■ الأكاسيد الوسيطة *les oxydes intermédiaires* :

هي أكاسيد تقوم بالوظيفتين أكاسيد مشكلة و أكاسيد مغيرة منها (AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PbO, ZnO, CdO, TiO<sub>2</sub>) و تعمل هذه الأكاسيد على استقرار الشبكة الزجاجية بمنحها خاصية عدم التغير و الذوبان [6].

### 7.I. أنواع الزجاج:

تنقسم أنواع الزجاج إلى ثلاثة عائلات كبرى و هي الزجاج الأكسيدي (Les verres oxydes) و الزجاج الهالوجيني (Les verres d'halogénure) و الزجاج الكالكوجيني (Les verres de chalcogénure) [7].

### 1.7.I. الزجاج الأكسدي *Les verres d'oxydes*

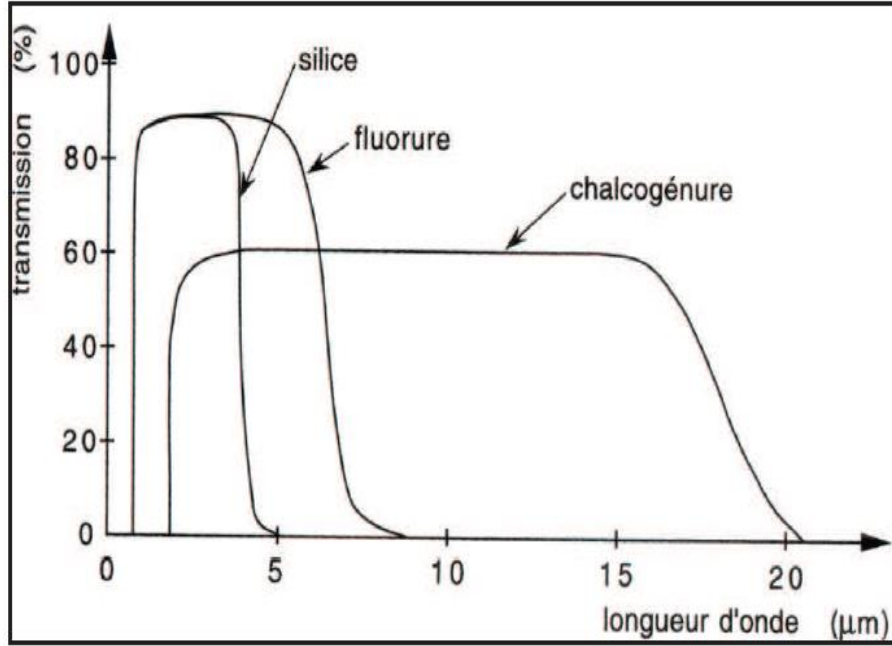
يمثل هذا النوع من الزجاج أكبر عائلات الزجاج الصناعي و يتميز بخصائص ترموديناميكية ممتازة و بقاء كيميائي جيد و له استقرار حراري عالي و مقاومة عالية جدا للتآكل، يستعمل هذا النوع من الزجاج لصناعة الألياف الزجاجية البصرية و بعض أنواع زجاج اللحام مع المعادن و يستعمل في تطبيقات زجاج الليزر. و له عدة أنواع (زجاج أكسيد الجرمانيوم، زجاج أكسيد السيليسيوم، زجاج أكسيد البور، زجاج أكسيد الفوسفور) [7].

### 2.7.I. الزجاج الهالوجيني *Les verres d'halogénures*

الزجاج الهالوجيني أساسه الأملاح (الفلورور، الكلورور، البرومور، اليودور)، أغلب أنواعه غير مستقرة كيميائيا ماعدا زجاج الفلورايد له خصائص ميكانيكية و كيميائية جيدة. تشكل بعض مركبات الفلوريدات أنواع من الزجاج اللاعضوي و هي ذات أهمية تجارية نظرا لنفوذتها للأشعة تحت الحمراء و لاستخدامها في الألياف البصرية للاتصالات [7].

### 3.7.I. الزجاج الكالكوجيني *Les verres de chalcogénures*

اكتشف هذا النوع من الزجاج سنة 1945، حيث يتم تشكيل هذا النوع من الزجاج من عناصر المجموعة  $IV_a$  ممزوج بعناصر أخرى، كما تعد بعض العناصر الكالكوجينية (الكبريت و السيلينيوم) أساس الزجاج الكالكوجيني الذي يتميز بشفافيته الكبيرة للأشعة تحت الحمراء و استقراره الكيميائي كما تتميز جزيئاته بروابط كيميائية متكافئة و قرينة انكسار خطي أكبر من [2] 7.



الشكل (4.I): مجال شفافية مختلف أنواع الزجاج

## 8.I. خصائص الزجاج

### 1.8.I. الخواص الضوئية

#### • الشفافية *Transparence*

يمتاز الزجاج بشفافية صافية متجانسة، تمر من خلاله جميع الأشعة الضوئية من فوق البنفسجية إلى تحت الحمراء كما أن له خاصية

الاحتفاظ بالأشعة ذات التأثير الحراري، و تعرف الشفافية بقانون Beer Lambert [8] :

$$I = I_0 \exp(-\alpha X) \quad \dots\dots\dots (1.I)$$

**I** : شدة الاشعاع الصادر

**I<sub>0</sub>** : شدة الاشعاع الوارد

**X** : سمك عينة الزجاج

**α** : معامل الامتصاص

• **قريئة الانكسار *Indice de refraction***

قريئة انكسار الزجاج  $n$  تعبر عن سرعة انتشار الضوء في الزجاج و هي النسبة بين سرعة الضوء  $c$  في الفراغ و سرعة الضوء في الزجاج  $v$  [8].

$$n = c/v \dots\dots\dots(2.I)$$

سرعة الضوء في الفراغ هي نفسها مهما كان الطول الموجي، و هذا ليس في جميع المجالات الأخرى. و بالتالي فان قريئة الانكسار تعتمد على الطول الموجي، تتناقص قريئة الانكسار كلما زاد الطول الموجي  $\lambda$ .  
هذا الاختلاف يسمى التبدد و يعرف بالعلاقة التالية:

$$D=\Delta n/\Delta \lambda \dots\dots\dots(3.I)$$

2.8.I. الخواص الحرارية

• **اللزوجة *Viscosité***

تعد اللزوجة من أهم خصائص الزجاج، فهي عامل مهم في تشكيله، و تتعلق خاصة بدرجة الحرارة و التركيب الكيماوي. ترتبط اللزوجة بمقاومة السائل لاجهادات القص فكلما كانت اللزوجة عالية كانت اجهادات القص عالية [6].  
يمكننا اعتبار الزجاج كسائل مثالي ترتبط لزوجته  $\eta$  باجهاد القص  $\sigma$  و سرعة التشوه الزاوي  $\frac{dy}{dt}$ .

• **التوصيل الحراري *Conductivité thermique***

يتميز الزجاج بتوصيل حراري ضعيف حيث يكون معدل سريان الحرارة في الزجاج أقل بكثير مقارنة بالمعادن.

• **التمدد الحراري *Dilatation thermique***

عند ارتفاع درجة الحرارة ترتفع الطاقة الحرارية، مما يؤدي الى زيادة سعة اهتزاز الجزيئات. و ينجم عن ارتفاع درجة الحرارة التمدد الحراري، الذي يعلمنا عن ردود فعل الزجاج للصدمات الحرارية.

• **البقاء الكيماوي *Durabilité chimique***

هو مفهوم يعبر عن مدى مقاومة الزجاج للتاكل الناتج عن تعرضه للمحاليل المائية كالأحماض و رطوبة الجو و العوامل الكيمائية.

### I.3.8. الخواص الكهربائية

في الدرجات الحرارة العادية يكون الزجاج رديء التوصيل للكهرباء و يعتبر في هذه الحالة من المواد العازلة، و تختلف مقاومة الزجاج للكهرباء باختلاف تراكيبه، و بارتفاع درجة الحرارة تقل مقاومة الزجاج للتيار الكهربائي، بل تزيد الرطوبة من قابلية التوصيل للتيار الكهربائي كما ان السطح الخشن للزجاج يقلل من مقاومة التيار [8].

### I.4.8. الخواص الميكانيكية

#### ● الصلادة

و هي قدرة مقاومة الزجاج لعوامل الخدش و الاحتكاك ، و تختلف صلادة الزجاج باختلاف تركيبه. فالزجاج البوتاسي اكثر انواع الزجاج صلادة فهو يقاوم عوامل الاحتكاك دائما، تقدر صلادة الزجاج بنسب الاكاسيد المكونة له [9].

#### ● المرونة

و هي عودة الجسم الى شكله الاصلي بعد زوال المؤثر عليه و تقدر مرونة الجسم بالثقل الذي يتحمله. و تزداد مرونة الزجاج بارتفاع درجة الحرارة [9].

#### ● المتانة

تختلف متانة الزجاج باختلاف تركيبه فمثلا تزداد المتانة بزيادة نسبة السيليكا، بينما نلاحظ ان متانة الزجاج تضعف بالتسخين الطويل [9].

## 9.I. خاتمة

ذكرنا في هذا الفصل بعض المفاهيم الأساسية حول الزجاج، الزجاج هو جسم صلب لابلوري يتمتع بظاهرة الانتقال الزجاجي، فمن الممكن الحصول عليه بعدة مركبات بحيث يختلف نوع الزجاج باختلاف تركيبه، و قد بينا أنه هناك ثلاث عائلات كبرى للزجاج و هي الزجاج الأكسيدي، الهالوجيني، الكالكوجيني، كما تطرقنا في نهاية هذا الفصل الى بعض خصائص الزجاج مثل الخصائص الضوئية و الحرارية و الكهربائية و الميكانيكية.



# الفصل الثاني:

## الخصائص المرونية للزجاج

## 1.II. تمهيد

يعتبر الزجاج ماد صلبة مرنة، و هذا يعني أنه عند تعرضه لاجهاد ميكانيكي فإنه ينكسر تماما، وتمثل ميكانيكا المواد الصلبة محتوى نظرية المرونة، التي تعرف باستجابة المواد للاجهادات المطبقة عليها التي تصف طريقة التشوهات الصلبة عندما يتم تطبيق الضغوط الخارجية.

## 2.II. نظرية المرونة

### II. 1.2. وصف خصائص المرونة من المواد الصلبة

يوصف السلوك العياني لمادة صلبة عن طريق نظرية الحقل المستمر وهي نظرية المرونة، التي تصف طريقة التشوهات الصلبة عندما يتم تطبيق الضغوط الخارجية، و قابلية المادة على استعادة شكلها الأصلي بعد إزالة القوة المؤثرة والمسببة للتشوه [10]. فان الجسم الصلب يسلك شكل وحجم التغيرات إلى حد ما تحت تأثير الإجهاد المطبق ، وكل نقطة في الجسم الصلب تكون عموما غير متوضعة. و يعبر عن مؤثر الاجهاد لتشوهات صغيرة اذا كان  $(x_1, x_2, x_3)$   $u_{ij}$  ،  $j$  هو عنصر النزوح عند النقاط  $(x_1, x_2, x_3)$  بـ [11]:

$$u_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1.II)$$

عندما يحدث تشوه، فان الجسم لن يكون في حالته الأصلية من التوازن، وبالتالي تنشأ القوى التي تسمى الضغوط الداخلية والتي تميل لعودة الجسم إلى حالة توازنه.

إذا كان تشوه الجسم صغير نوعا ما، فإنه يعود إلى حالته الأصلية عندما يتوقف تأثير القوى الخارجية، و تعرف هذه التشوهات بالتشوهات المرنة. اما التشوهات الكبيرة فإنه عند إزالة القوى الخارجية لا يمكن للجسم ان يعود لشكله الكامل بعد التشويه، وهذه التشوهات تكون بلاستيكية. هناك أنواع مختلفة من المعاملات حيث يعتمد نوع المعامل على نوع التشوه الذي تتعرض له المادة كالاستطالة والانحناء وغيرها. وتمثل المعاملات جميعها بإيجاد نسبة الإجهاد إلى الانفعال ضمن حدود المرونة.

## 1- الإجهاد Stress

يعرف بأنه القوة المؤثرة على وحدة المساحات ووحدته نيوتن / م<sup>2</sup> والإجهاد أنواع منها إجهاد الشد وينتج عنه زيادة في الطول وإجهاد الضغط وينتج عنه نقص في الطول أو تغير في الحجم وإجهاد القص (إجهاد مماسي) و ينتج عنه تغير في شكل الجسم الهندسي [10][11].

## 2- الانفعال Strain

يعرف الانفعال أو المطاوعة بأنه تشوه تلك المادة كما يعرف أيضا على انه التغير النسبي الذي يسببه الإجهاد لأبعاد الجسم أو شكله أو حجمه، وهناك أنواع عدة للمطاوعة وهي مطاوعة الشد ومطاوعة الكبس ومطاوعة القص [10][11]. للحصول على الخواص الصلبة، في حالة تشوهات مرنة، مؤثر الإجهاد في شروط مؤثر الانفعال تعطى بالعلاقة [11]:

$$\sigma_{ij} = Ku_{ll}\delta_{ij} + 2G(u_{ij} - \delta_{ij}u_{ll}/3) \quad (2.II)$$

حيث K: هو معامل الجسمي.

G: هو معامل العرضي

و يتم وصف سلوكها المرن بالكامل من قبل معامل الطولي L و ايضا معامل العرضي و تعرف علاقة كوشي العلاقة بين L و G بـ (L=3G)، و هذه العلاقة صالحة للمواد الصلبة موحدة الخواص التي تتألف من جزيئات تتفاعل مع جسيمين القوة المركزية ويمكن ان ينص عليه [11]:

$$K = \frac{5}{3}G \quad (3.II)$$

وهذا يعني أن L و K تساوي 0 عندما G = 0.

بالتفاعل الكموني للينارد جونز، هذه العبارة تتغير  $L=a+bG$  حيث a و b ثوابت. وهذا يؤدي إلى العلاقة [11]:

$$K = a + (b - 1.333)G \quad (4.II)$$

والذي يعرف باسم علاقة كوشي المعممة.  $a$  و  $b$  تبقى ثابتة مع تغير درجة الحرارة والضغط، ولكن تتأثر بتغير صغير في الكمون. هذه العلاقة هي صالحة لكل من السوائل و الزجاج.

في الآونة الأخيرة، لوحظ تعميم علاقة كوشي على اجرائها في السوائل فائقة التبريد ويمكن التعبير عن:  $L(T) = BG(T) + A$ ، حيث  $A$  و  $B$  ثوابت مستقلة من  $T$  و  $P$  ضمن نطاق تعمل على التحول الزجاجي.

للتشوه البسيط فان  $u_{ij}$  هي دالة خطية، وهذا التشوه يتناسب مع القوى المطبقة. يسمى هذا القانون بقانون هوك، الذي هو في الواقع ينطبق على التشوهات كلها تقريبا مرنة في المواد الصلبة. في حالة بسيطة لتشوهات متجانسة فيه موثر الانفعال هو ثابت في جميع أنحاء حجم الجسم، و موثر الإجهاد معطى بدلالة موثر الانفعال [11]:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left( u_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} u_{ij} \delta_{ij} \right) \quad (5.II)$$

حيث  $E$ : هو معامل يونغ.

## 2.2.II. المعاملات المرونية Modules Elastiques

يعتبر الزجاج مادة صلبة مرنة، و هذا يعني عند تعرضه لاجهاد ميكانيكي فانه ينعكس تماما [16].

و تعرف هذه النظرية بتفاصيل استجابة المواد للاجهادات المسلطة عليها حيث تستعمل معاملات مختلفة و تعرف بالمعاملات المرونية

هي: معامل يونغ  $E$ ، المعامل الجسمي  $k$ ، المعامل العرضي  $G$ ، و المعامل الطولي  $L$ ، بالإضافة الى نسبة بواسون  $\nu$ . [13]، [12]

### 1- المعامل الطولي Mdoule de Longitudinale

المعامل الطولي  $L$  يعبر عن استطالة العينة تحت تأثير الاجهاد الطولي، يحدث توسع في اتجاه عمودي على استطاله الانكماش العرضية [12].

$$L = \rho v^2_L \quad (6.II)$$

### 2- المعامل الجسمي Module de Rigidité

يصف المعامل الجسمي استجابة انفعال الجسم إلى الضغط الهيدروستاتيكي الذي يعمل على تغيير في الحجم دون تغيير الشكل ويطبق الاجهاد على جميع الاطراف، و هذا يؤدي الى ضغط يحدد المعامل الجسمي  $k$  و تعطى عبارته بـ [12]:

$$K = \rho \left( v^2_L - \frac{4}{3} v^2_s \right) \quad (7.II)$$

### 3- المعامل العرضي Module de Cisaillement

ويتعلق المعامل العرضي باستجابة انفعال الجسم للإجهاد القص، الذي يعمل على تغيير الشكل دون تغيير الحجم واجهاد القص يؤدي الى عملية القص، و المعامل الموافق  $G$  يحمل الكثير من التسميات و هي معامل القص، المعامل العرضي ومعامل الالتواء ويعبر عنه بـ [12] .:

$$G = \rho v_s^2 \quad (8.II)$$

### 4- معامل يونغ Module de Yong

يدعى معامل يونغ نسبة الى توماس يونغ (العالم البريطاني القرن ال19). ومع ذلك، تم تطوير مفهومه في عام 1727 من قبل ليونارد يولر، وأجريت التجربة الأولى التي يستخدم فيها مفهوم معامل يونغ من قبل العالم الإيطالي جيوردانو ريكاتي في 1782. ويعرف معامل يونغ باسم معامل الشد، هو مقياس لصلابة من مادة مرنة الخواص. ويعرف بأنه نسبة الإجهاد ذو محورين على انفعال ذو محورين في نظام مرن. [13]، [12]

هذا ويمكن تحديده تجريبيا من منحنى الإجهاد والانفعال التي تم إنشاؤها أثناء اختبارات الشد أو الضغط التي أجريت على المواد. وبشكل غير صحيح، يسمى معامل يونغ بمعامل المرونة، لأن معامل يونغ  $E$  هو ثابت مرونة الأكثر شهرة، والذي هو الأكثر شيوعا في التصميم الهندسي [11]. ويمكن إعطاء  $E$  بالعلاقة التالية :

$$E = \rho v_s^2 \frac{(3v_L^2 - 4v_s^2)}{v_L^2 - v_s^2} \quad (9.II)$$

### 5- نسبة بواسون Coefficient de Poisson

سميت نسبة الى سيميون بواسون، وهي خاصية مادية هامة تستخدم في تحليل المرونة من المواد، عندما يتم ضغط مادة في اتجاه واحد، فإنه يميل عادة للتوسع في غيرها من اتجاهين عمودي على اتجاه الضغط. وتسمى هذه الظاهرة تأثير بواسون، وهي النسبة بين الانكماش العرضي والاستطالة النسبية [16] [12]. و تعطى بالعلاقة :

$$\nu = \frac{(v_L^2 - 2v_s^2)}{2(v_L^2 - v_s^2)} \quad (10.II)$$

### II.3. الخصائص المرنة للجسم الصلب

تعتمد الخصائص المرنة للجسم الصلب على درجة الحرارة، يمكن للتشوهات أن تحدث مصحوبة بتغيير في درجة حرارة الجسم إما نتيجة لعملية تشويه نفسها أو من أسباب خارجية. ومن بين أنواع مختلفة من التشوهات، تشوهات متساوي الحرارة ومكظوم الحرارة ذات أهمية. في تشوه متساوي الحرارة، درجة حرارة T للجسم لا تغير  $K$ ،  $E$ ،  $G$ ، و  $\nu$  وبالتالي يمكن أن تسمى معاملات المرونة متساوي الحرارة [12].

إذا لم يكن هناك تبادل الحرارة بين أجزاء مختلفة من الجسم، يسمى تشوه ثابت الحرارة، وتسمى معاملات المرونة ثابتة الحرارة  $G_{ad}$ ،  $K_{ad}$ ،  $E_{ad}$ ، و  $\nu_{ad}$  [11].

العلاقات بين ثابت الحرارة ومتساوي الحرارة و معاملات المرونة [11] هي:

$$1/K_{ad} = 1/K - \frac{T\alpha^2}{C_p} \quad (11.II)$$

$$G_{ad} = G$$

$$E_{ad} = \frac{E}{1 - E T \alpha^2 / 9 C_p} \quad (12.II)$$

$$\nu_{ad} = \frac{\nu + E T \alpha^2 / 9 C_p}{1 - E T \alpha^2 / 9 C_p} \quad (13.II)$$

حيث  $\alpha$  هو معامل التمدد الحراري للجسم الصلب. هذا هو تأثير ديباي-Grüneisen التمدد الحراري على الثوابت المرنة للحالة المعزولة.

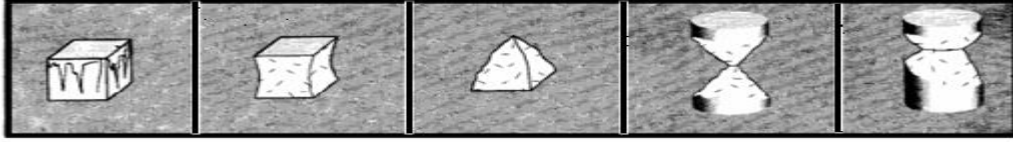
### II.4. الاختبارات الميكانيكية

ان الهدف من كل اختبار هو ضمان اداء عمل المواد و الاجزاء بالطريقة المتوقعة منها لهذا الغرض هنالك بصورة أساسية نوعان من الفحوصات الميكانيكية هما الاختبار الاتلافي و الاختبار اللاتلافي [14]:



## II.1.4. الاختبار الاتلافي

هو الفحص الذي يتلف القطع الاختبارية خلال اجراء عملية الاختبار الذي يفقد الاستفادة من المادة بعد اجرائها، و لهذا سمي بالاختبار الاتلافي و كمثال على ذلك اختبار الشد و اختبار الانضغاط و اختبار الالتواء و الانحناء و الصلادة [15].



الشكل (II.1): يوضح الاختبارات الاتلافية

## II.2.4. الاختبار غير الإتلافي

هو الاصطلاح الذي يطلق على كل الطرائق الممكنة لفحص المواد و الاجزاء دون اتلافها او التأثير على العمل الذي صممت من اجله او على عمرها في ما بعد، و تعتبر الاختبارات اللاتلافية واحدة من أهم الوسائل للكشف و التحقق من جودة المواد [15].  
و من بين الاختبارات اللاتلافية الفحص البصري، الجسيمات المغناطيسية و التصوير الإشعاعي، ومن اهم الطرائق في الاختبار هي تقنية الأمواج فوق الصوتية.

## II.1.2.4. اختبارات الأمواج فوق الصوتية (Ultrasonic Testing UT)

ان استخدام الموجات الصوتية عالية التردد، و هو ما يعرف باسم الموجات فوق الصوتية، يعد من اهم التقنيات المطبقة اليوم لاختبار سماكة المواد والكشف عن العيوب المادية العميقة.

وتعمل الاختبارات فوق الصوتية بالطريقة نفسها التي تعمل بها الرادارات، أي النبضات و الصدى خلال فترات زمنية قصيرة، تنتقل ذبذبات ميكانيكية إلى المادة المختبرة، أي قطعة الاختبار و تنتقل الذبذبات عالية التردد عبر المادة في حزمة ضيقة إلى أن تصل إلى الطرف الثاني من قطعة الاختبار، وفي حال صادفت الموجة فوق صوتية عيبا في المادة، فإنها ستنعكس بحيث تعيد الإشارة إلى المصدر و هنا علينا قياس الفترة الزمنية إذا ما أردنا أن نحسب دقة عمق العيب تكل قطعة الاختبار. و تستخدم الترددات العالية لان الترددات الصوتية لا تحقق النتيجة المرجوة، حيث ان الموجة الصوتية تحتاز العيوب الصغيرة [15].

حيث يتولى مولد النبضات إصدار نبضات عالية الترددات، وتتحول النبضات الكهربائية من قبل المحول (transducer) إلى ترددات مقابلة والتي تنتقل إلى قطعة الاختبار.

يتلقى المحول إشارة الصدى ليحولها الى المستقبل المضخم لمعالجة الإشارة وتصل مخرجات المستقبل الى الشاشة في شكل صورة تفسر ما حدث، ويتم وصل الساعة أيضا مع الشاشة لإعطاء عنصر الوقت الذي له أهمية في تفسير الإشارة.

## II.5. الطرق التجريبية لتحديد المعاملات المرنة للزجاج

### II.5.1. طريقة الامواج فوق الصوتية

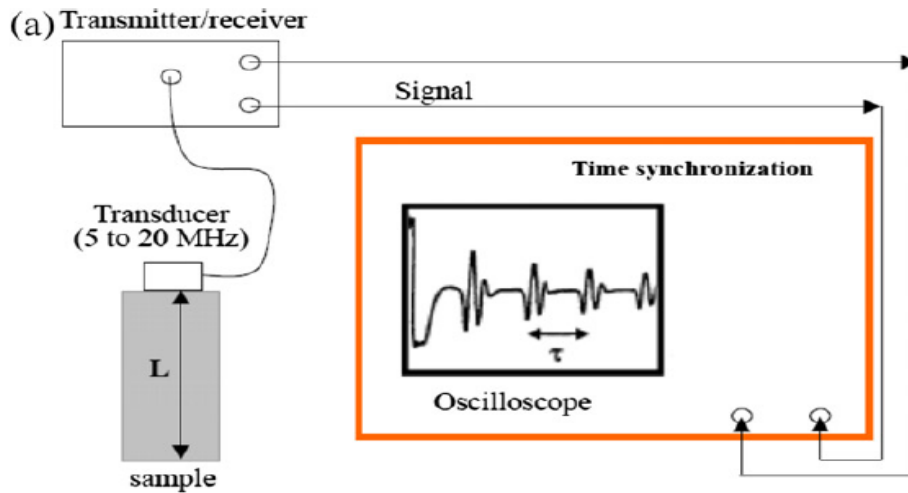
يتم تعيين معاملات المرونة بطريقة الامواج فوق الصوتية هيكلها و خصائصها. ويمكن قياس الثوابت المرنة بالعديد من الطرق مثل: طريقة التشوه الميكانيكية او طريقة انتشار الامواج فوق الصوتية بالنسبة للسوائل، و يمكن الحصول على الثوابت المرنة من قياسات سرعة الموجات فوق الصوتية عالية التردد.

تنقسم طرق تحديد المعاملات المرنة في المواد الصلبة الى طرق ثابتة و ديناميكية، يمكن اعتبار في الطرق الثابتة والمرنة ثابت الحرارة و متساوي الحرارة هي شروط القياس على التوالي.

في حين الشروط التجريبية تؤثر تأثيرا كبيرا على دقة قياس المعاملات المرنة و الطرق الثابتة هي ايضا من الصعب تطبيقها على المواد الهشة مثل المواد الزجاجية [11].

الطرق الديناميكية لديها درجة عالية من الدقة النسبية وفقا لتطبيق مجموعة من الترددات و تصنف على النحو التالي:

الطريقة الصوتية و طريقة الأمواج فوق الصوتية و يمكن تطبيق هذه الطرق على نطاق واسع لدراسة الخصائص المرنة للزجاج والسوائل المكونة للزجاج لذلك نركز على طريقة واحدة من الطرق الديناميكية و هي طريقة الامواج فوق الصوتية.



الشكل (II.2): رسوم توضيحي لطريقة الموجات فوق الصوتية

## II-1-5-1 نظرية القياس بالموجات فوق الصوتية

سرعة انتشار الموجات فوق الصوتية مثل الموجات الطولية، والقص يعتمد على طبيعة المواد. ومع ذلك، في مادة معينة، سرعة انتشار الموجات فوق الصوتية موجة مستقلة عن ترددها والبعد من المواد. في المواد الصلبة متجانسة الخواص مثل المواد زجاجية، يتم التعبير عن معادلات الموجة الصوتية كما يلي [11]:

$$\text{الوضع الطولي} \quad \frac{d^2 u}{dt^2} = \frac{L d^2 u}{\rho dX^2} \quad (14.II)$$

$$\text{الوضع العرضي} \quad \frac{d^2 u}{dt^2} = \frac{G d^2 u}{\rho dX^2} \quad (15.II)$$

أين  $u$  هو النزوح،  $L$  هو المعامل الطولي. من المعادلات أعلاه، نحصل على [11]:

$$L = \rho v_L^2 \quad (16.II)$$

$$G = \rho v_s^3 \quad (17.II)$$

$v_L$  و  $v_s$  هي السرعات الصوت الطولي والعرضية، على التوالي ويمكن تعميم تقريبا أن  $v_s$  هي نصف  $v_L$  في المواد المعدنية متجانسة، وهذا هو  $v_L = 2v_s$ . و يمكننا التعبير عن المعادلات  $E$ ،  $K$ ، و  $\nu$  من المواد الصلبة آيزوتروبية مثل الزجاجيات يمكن إعطاؤها في الشروط  $v_L$  و  $v_s$  والكثافة كما يلي [11]:

$$K = \rho \left( v_L^2 - \frac{4}{3} v_s^2 \right) \quad (18.II) \quad \text{3- المعامل الجسمي}$$

$$\nu = \frac{(v_L^2 - 2 v_s^2)}{2(v_L^2 - v_s^2)} \quad (19.II) \quad \text{4- نسبة بواسون}$$

$$E = \rho v_s^2 \frac{(3v_L^2 - 4 v_s^2)}{v_L^2 - v_s^2} \quad (20.II) \quad \text{5- معامل يونغ}$$

## 7-II درجة حرارة ديباي Temperature Debye

نظرية ديباي لحساب الحرارة النوعية [18]:

عند درجات الحرارة المنخفضة، وعندما يظهر التأثير الكمي بوضوح، نجد أن معظم المواد تكون في الحالة الصلبة. وكما علمنا سابقاً أن الذرات بالبلورة تؤخذ على أنها متطابقة ومميزة ولها موضع ثابت، ألا وهو نقاط الشبكية (Lattice point). وبالتالي فإن أي إزاحة صغيرة عن وضع الاتزان، لإحدى الذرات، سوف يتبعها إزاحة للذرات المجاورة. ونتيجة لهذا التأثير سوف تنتشر موجة أو موجات (تسمى موجات مرنة) خلال البلورة. وبمعرفتنا بالطبيعة الموجية لحركة الذرات بشبكة البلورة سوف يسهل علينا استخدام النظرية الإحصائية الكمية لدراسة الحرارة النوعية للبلورات. وذلك بالمقارنة بنظرية الأشعة الكهرومغناطيسية داخل تجويف. والمشكلة الرئيسية تكمن هنا في أن شبكة البلورة غير متصلة وبالتالي فإن جميع أنواع الاهتزازات تصبح ممكنة. وبناء عليه يجب أن نتعامل مع جميع الاهتزازات للبلورة ككل، انظر الشكل (5.II).



الشكل (3.II): بعض من الموجات المستعرضة في اتجاه واحد لبلورة

وقد افترض ديباي أنه إذا كانت المسافات البينية لذرات الجسم الصلب أصغر من أطوال الموجات المرنة، فإننا نستطيع أن نعتبر أن الجسم الصلب كجسم مائع، وهذا من وجهة نظر النظرية الموجية، واعتماداً على هذه الفكرة، فإن ديباي أقام نظريته على الفرضيات التالية:

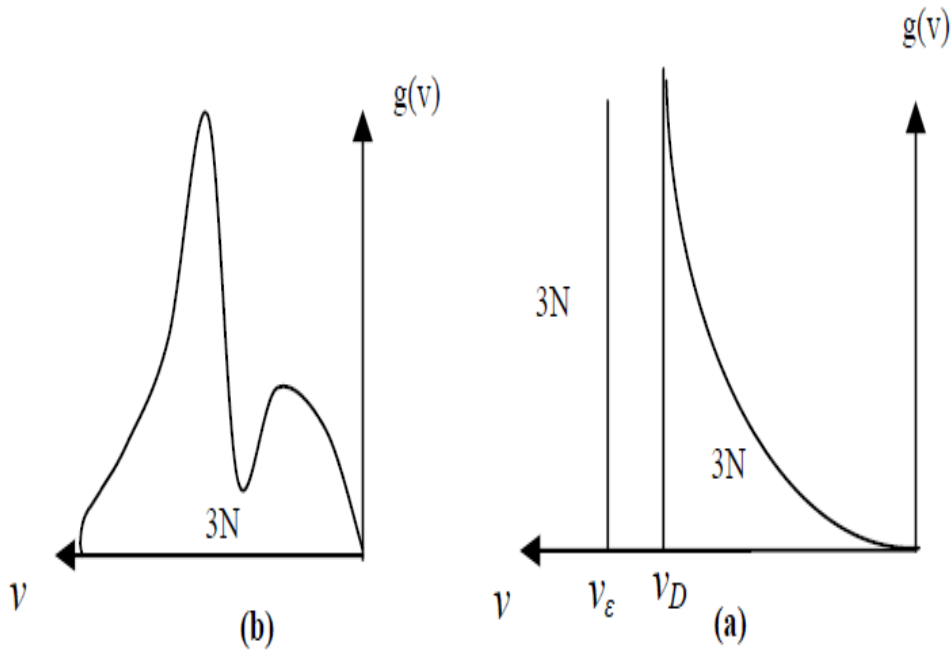
- 1- تتأثر حركة كل ذرة نتيجة حركة الذرات المجاورة لها.
- 2- التردد الوحيد لذرات الجسم الصلب والمفترض بواسطة أينشتاين سوف يتم الاستعاضة بتردد  $\nu_D$  وتسمى  $\nu_D$  عنه بطيف من الترددات الاهتزازية والتي لها قيمة عظمى ديباي.
- 3- بالمقارنة بنظرية الموجات الكهرومغناطيسية داخل تجويف (حيث استخدمت الفوتونات بدلاً من الموجات)، فإن الجسم الصلب ينظر إليه على أنه غاز ذو جسيمات مستقلة (تسمى فونون، وهي كمية الطاقة للموجات المرنة) داخل الحجم  $V$  وهو حجم

الجسم ، الصلب. والفرق الجوهرى بين الفوتون والفونون هو أن الفوتون له اتجاهان مستعرضان للاستقطاب، أما الفونون فله ثلاثة اتجاهات للاستقطاب، اثنان مستعرضان والثالث طولى. ومن خلال الفرضيات السابقة فإن عدد الأنماط (مستويات طاقة الفونونات) الموجودة بين قيمتي التردد  $\nu$  و  $\nu + d\nu$  تعطى من العلاقة:

$$g(\nu)d\nu = 4\pi V \left( \frac{2}{v_t^3} + \frac{1}{v_l^3} \right) \nu^2 d\nu \quad (21.II)$$

حيث تم استخدام العددين "2" و "1" في بسط المعادلة (1) نتيجة لاتجاهات السرعة الموجية المرنة (موجتين مستعرضتين متعامدتين على بعضهما ولهما سرعتان متساويتان  $v_t$  وموجة طولية لها سرعة  $v_l$ ).

ويظهر الفرق بين الكثافة  $g(\nu)$  في تقريب ديبي وأينشتين في الشكل (a.(6.II)) و الشكل (b.(6.II)). يوضح الكثافة  $g(\nu)$  لبلورة حقيقية، وفيه نجد أن  $g(\nu)$  تبدأ في ازدياد يتناسب مع  $\nu^2$  للترددات المنخفضة، ويظهر عدم الاستمرارية (عدم الانتظام) مع زيادة التردد.



الشكل (4.II) الكثافة  $g(\nu)$  في تقريب ديبي وأينشتين

ولحساب القيمة العظمى للتردد المسموح ( $\nu_D$  (Cut-off fréquence) فقد ساوى ديباي الأنماط الكلية للتذبذب بالقيمة  $3N$  من خلال المعادلة:

$$\int_0^{\nu_D} g(\nu) d\nu = 3N \quad (22.II)$$

و بالتعويض في المعادلة (21.II) نحصل على :

$$4\pi V \left( \frac{2}{v_t^3} + \frac{1}{v_l^3} \right) \int_0^{\nu_D} \nu^2 d\nu = 3N \quad (23.II)$$

و باجراء التكامل للمعادلة (23.II) نجد :

$$\nu_D^3 = \frac{9N}{4\pi V} \left( \frac{2}{v_t^3} + \frac{1}{v_l^3} \right)^{-1} \approx \frac{3N}{4\pi V} v_s^3 \quad (24.II)$$

حيث  $v_s$  هي سرعة الصوت المتوسطة في المادة ، و قد استخدم التقريب  $1/v_t^3 = 1/v_l^3 \approx 1/v_s^3$

لذلك فان :

$$\nu_D \propto \left( \frac{N}{V} \right)^{1/3} = \rho^{1/3} \quad (25.II)$$

و تتعين بالقيمة المتوسطة للمسافة الداخلية بين الذرات. لذلك فان التركيب البلوري يضع حدا سفليا للطول الموجي ، بمعنى :

$$\lambda_{\min} \propto \rho^{-1/3}$$

من هذا الوصف نجد ان الترددات المرتفعة ،  $\nu \geq \nu_D$  لا تعطي أنماط جديدة للاهتزازات الذرية. و بناءا على هذا نضع ( بعد

التعويض من (24.II) في (21.II)



$$g(\nu) = \begin{cases} 9N \frac{\nu^2}{\nu_D^3} & \text{for } \nu \leq \nu_D \\ 0 & \text{for } \nu \geq \nu_D \end{cases} \quad (26.II)$$

وقانون التوزيع لبوز-أينشتاين للفونون (وهو مشابه للفوتون) يعطى بالشكل:

$$dn = \frac{g(\nu)d\nu}{e^{\beta h\nu} - 1} \quad (27.II)$$

ومن المعادلتين (26.II) و (27.II) نجد أن:

$$\frac{dn}{V} = \begin{cases} \frac{9N}{\nu_D^3} \frac{\nu^2}{e^{\beta h\nu} - 1} d\nu, & \nu \leq \nu_D \\ 0, & \nu \geq \nu_D \end{cases} \quad (28.II)$$

وبضرب المعادلة (28.II) بطاقة الفونون  $E = h\nu$  فإننا نحصل على الطاقة الداخلية لوحدة الحجم، أو كثافة الطاقة بالشكل:

$$du = \frac{dU}{V} = \frac{9Nh}{\nu_D^3} \frac{\nu^3}{e^{\beta h\nu} - 1} d\nu \quad (29.II)$$

وبتعريف درجة الحرارة لديباي "Debye temperature" بالصورة:

$$\Theta_D = \frac{h\nu_D}{k_B} \quad (30.II)$$

وهي درجة الحرارة التي تفصل بين سلوك الكميات الفيزيائية، مثل الحرارة النوعية، كلاسيكيًا عندما  $(T > \Theta_D)$  وكميًا عندما  $(T < \Theta_D)$  وكما ذكرنا سابقًا، فإنه لحساب  $\Theta_D$

يجب أن نعين التردد الطبيعي الاهتزازي للمادة  $\nu_D$  والتي يمكن تعيينها من حساب سرعة الصوت في المادة المطلوبة. وحيث إن  $\Theta_D$  هي المعامل

الوحيد في النظرية، لذلك إذا رسمنا الحرارة النوعية لمواد صلبة مختلفة

كدالة في المتغير  $T/\Theta_D$ ، فسوف نجد أن جميع نقاط النتائج العملية تقع على منحنى واحد.

ولحساب كثافة الطاقة الكلية سوف نستخدم التعويض التالي:

$$x = \frac{h\nu}{k_B T}, \quad (31.II)$$

$$x_D = \frac{h\nu_D}{k_B T} \equiv \frac{\Theta_D}{T}, \quad (32.II)$$

لنحصل على:

$$\begin{aligned} u - u_0 &= \int_0^{\nu_D} du = \frac{9Nh}{\nu_D^3} \int_0^{\nu_D} \frac{\hbar \nu^3}{e^{\beta h \nu} - 1} d\nu \\ &= \frac{9Nk_B T}{x_D^3} \int_0^{x_D} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \end{aligned} \quad (33.II)$$

حيث  $u_0$  تعبر عن طاقة نقطة الصفر، وهي كمية ثابتة لا تؤثر في حساب الحرارة النوعية.

والحرارة النوعية تحسب من المعادلة:

$$\begin{aligned}
 C_V &= \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_V = \frac{9Nh}{\nu_D^3} \frac{\partial}{\partial T} \int_0^{\nu_D} \frac{\nu^3}{e^{\beta h\nu} - 1} d\nu \\
 &= \frac{9Nh}{\nu_D^3} \frac{h\nu}{k_B T^2} \int_0^{\nu_D} \frac{\nu^4 e^{\beta h\nu}}{(e^{\beta h\nu} - 1)^2} d\nu \\
 &= \frac{9Nk_B}{x_D^3} \int_0^{x_D} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx
 \end{aligned} \tag{34.II}$$

الآن نحسب هذه الكميات الفيزيائية عند درجات الحرارة "T" المرتفعة جدًا  $T \gg \Theta_D$  والمنخفضة جدًا  $T \ll \Theta_D$ .

1- عند درجات الحرارة المرتفعة جدًا :  $T \gg \Theta_D$

في المدى  $0 \leq x \leq x_D$  حيث  $x_D \ll 1$  نستطيع في المعادلتين (33.II) و (34.II) أن نضع في البسط  $e^x \approx 1$  و في المقام  $e^x - 1 \approx x$ . ولهذا نجد أن الطاقة الكلية من المعادلة (33.II) تعطي:

$$\begin{aligned}
 u - u_0 &= \frac{9Nk_B T}{x_D^3} \int_0^{x_D} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \\
 &= \frac{9Nk_B T}{x_D^3} \int_0^{x_D} x^2 dx = 3Nk_B T
 \end{aligned} \tag{35.II}$$

والحرارة النوعية من المعادلة (34.II) هي:

$$C_V \approx 3Nk_B \tag{36.II}$$

وهما يتطابقان مع النظرية التقليدية. وبتطابق نظريتي أينشتين وديباي مع النظرية التقليدية عند درجات الحرارة المرتفعة، فإن ذلك يعني أن السلوك الكمي للجسيمات غير موجود.

2- عند درجات الحرارة المنخفضة جدًا:  $T \ll \Theta_D$

في المدى  $0 \leq x \leq x_D$  حيث  $x_D \gg 1$  نستطيع أن نغير نهاية التكامل من  $x_D$  الى  $\infty$  ولهذا نجد أن كثافة الطاقة الكلية :

$$u - u_0 = \frac{9Nk_B T}{x_D^3} \int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx$$

$$\approx \frac{9Nk_B T}{x_D^3} \underbrace{\int_0^\infty x^3 e^{-x} dx}_{\frac{\pi^4}{15}} = \frac{3\pi^4}{5} Nk_B T \left( \frac{T}{\Theta_D} \right)^3 \quad (37.II)$$

ومن المعادلة (34.II) ، أو (37.II) ، نجد أن الحرارة النوعية هي :

$$C_V = \frac{9Nk_B}{x_D^3} \underbrace{\int_0^\infty \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx}_{\frac{4\pi^4}{15}} = \frac{12\pi^4}{5} Nk_B \left( \frac{T}{\Theta_D} \right)^3 \quad (38.II)$$

ومن المعادلة (38.II) يتضح أن الحرارة النوعية تتناسب طرديًا مع  $"T^3"$  وهو قانون ديبي الذي تم التحقق منه عمليًا عند درجات الحرارة المنخفضة.

و من العلاقة (24.II) و (30.II) نجد ان:

$$\Theta_D = \frac{h}{k_B} \left[ \frac{3n}{4\pi} \left( \frac{N_A \rho}{M} \right) \right]^{1/3} v_m, \quad (39.II)$$

$$V_m = \left( \frac{2}{V_s^3} + \frac{1}{V_l^3} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad \text{حيث :}$$

إذن درجة حرارة ديبي هي معيار مهم في المواد الصلبة، يتم التعبير عن ذلك لوصف خصائص الاهتزازات الذرية الناتجة عن ذلك.

درجة حرارة ديبي  $\Theta_D$  للمواد الصلبة آيزوتروبية يمكن أيضا حسابها من السرعات الصوتية والكثافة. للطول الموجي مثل الموجات

فوق الصوتية ، يمكن اعتبار الزجاج الصلب سلسلة مرنة كلاسيكية التي تجتمع تقريبا ديبي . بإستخدام البيانات الصوتية.

ولذلك، فإن سرعات الموجات فوق الصوتية وقياسات الكثافة ، تمكن الحصول بسهولة على المعاملات المرونية، ودرجة حرارة ديبي

للزجاج.

## II.6. الخاتمة

في هذا الفصل قمنا بإعطاء المفهوم الأساسي لنظرية المرونة ووصف الخصائص المرورية من المواد الصلبة، كما رأينا أهم الاختبارات الميكانيكية والهدف من كل اختبار و أثره على المواد و الأجزاء.

وتعرفنا في الأخير على أهم المعاملات المرورية، المتمثلة في معامل يونغ، نسبة بواسون و درجة حرارة التحول الزجاجي ودرجة حرارة ديباي، وأهم الطرق التجريبية لتعيين هذه المعاملات، و القينا الاهتمام على طريقة الأمواج فوق الصوتية، التي تعتبر من الطرق التجريبية الغير إتلافية، ومن أهم التقنيات المطبقة لاختبار المواد و الكشف عن العيوب.

وسندرس في الفصل القادم العلاقة بين مختلف المعاملات المرورية و محاولة اختصار عددها إلى اقل ما يمكن.

# الفصل الثالث:

العلاقة بين مختلف المعاملات المرونية

ودرجة حرارة التحول الزجاجي للزجاج الهالوجينوفوسفاتي

### III-1. تمهيد:

إن معرفة الخصائص المرونية للزجاج مهمة جدًا وضرورية من أجل معرفة مدة صلاحية الزجاج لاستعمال معين. سنحاول خلال هذا الفصل أن نجد علاقات تجمع بين مختلف معاملات المرونة من جهة، وبينها وبين درجة حرارة التحول الزجاجي من جهة أخرى وذلك بهدف إنقاص عدد المعاملات الواجب قياسها دوماً.

### III-2. العينات المدروسة

العينات المدروسة هي عينات من عائلتين لزجاج هالوجينوفوسفاتي: العائلة الأولى زجاج فليوروفوسفاتي ذو التركيب المولي:  $\text{NaPO}_3\text{-PbCl}_2\text{-BaCl}_2\text{:LnF}_3$  ، والعائلة الثانية هي زجاج كلوروفوسفاتي ذو التركيب المولي:  $\text{NaPO}_3\text{-SrF}_2\text{-ZnF}_2\text{:LnF}_3$ . سنسمي العينات اختصاراً بالأسماء الموضحة في الجدول

الجدول III.1: التسمية المختصرة لمختلف العينات

80NaPO3-10SrF2-10ZnF2	verre 1
79NaPO3-10SrF2-10ZnF2-1HoF3	verre 2
78NaPO3-10SrF2-10ZnF2-1HoF3-1YbF3	verre 3
90NaPO3-9PbCl2-1HoF3	verre 4
90NaPO3-8PbCl2-1HoF2-1YbF3	verre 5
80NaPO3-9PbCl2-10BaCl2-1HoF3	verre 6
80NaPO3-8PbCl2-10BaCl2-1HoF3-1YbF3	verre 7
90NaPO3-9PbCl2-1ErF3	verre 8
90NaPO3-8PbCl2-2ErF3	verre 9
80NaPO3-9PbCl2-10BaCl2-1ErF3	verre 10

### III-3. تعيين درجة التحول الزجاجي : مسعر المسح التبايني ( DSC ) :

تمّ تحديد درجة حرارة التحول الزجاجي للعينات محل الدراسة بواسطة تقنية التحليل باستخدام مسعر المسح الحراري التبايني.

### 1.3 تقنية التحليل باستخدام مسعر المسح الحراري التبايني ( DSC ) :

هي إحدى تقنيات التحليل الحراري المستخدمة في دراسة ما يحصل للعينات المراد فحصها من تغيرات في حالتها وتحولات حرارية ناتجة عن عمليات امتصاص و إطلاق للحرارة جراء عمليتي التسخين والتبريد.

يتألف جهاز مسعر المسح الحراري التبايني من ثلاث وحدات رئيسية :

1. وحدة الفرن الذي يعتبر المصدر الحراري حيث يصل مدى درجات الحرارة إلى درجة معينة على حسب نزعية الجهاز.
  2. وحدة حمل العينة ومادة المرجع والتي تتكون من بوتقتين صغيرتين مصنوعتين من مادة الألومينا إحداها للعينة المراد فحصها والأخرى لمادة المرجع والتي غالبا ما تترك فارغة ويحتويان على لاقط حراري ومحمولين على حاملين موصولين إلى المتحسس والذي عبارة عن مزدوج حراري يتحسس الفرق في درجات الحرارة بين العينة ومادة المرجع وموصولين إلى حاسب إلى لتسجيل هذا التغير في درجات الحرارة كدالة للزمن ويحولها إلى تدفق حراري على شكل إشارة يتم تسجيلها ورسمها في شكل منحنى على شاشة الحاسب الآلي ضمن برنامج محدد يوضح فيه المعدل الزمني للتدفق الحراري كدالة لدرجة الحرارة.
  3. وحدة حجرة التفاعل التي تتيح إجراء التحليل في أجواء الهواء أو الغاز أو الفراغ.
- يمتاز هذا الجهاز بحساسية وقدرة تحليل عالية ودقة فائقة. ويتم إجراء معايرة للجهاز قبل استخدامه في عمليات تحليل العينات وذلك باستعمال مواد قياسية مجهزة من قبل الشركة معروفة نقاط الانصهار.
- يعتمد مبدأ عمل الجهاز على تسخين البوتقتين بمعدل زمني ثابت ومنتظم للوصول إلى درجة حرارة المرجع وتمثل هذه العملية امتصاص للحرارة وبعدها يتم تبريد العينة إلى درجة حرارة الغرفة وذلك بمعدل زمني ثابت أيضا حيث تمثل هذه عملية إطلاق ونشر للحرارة.
- إن الفرق في درجات الحرارة بين العينة والمرجع تتناسب مع المعدل الزمني للتدفق الحراري من الفرن وإن هاتين العمليتين تؤديان إلى حدوث تغيرات وتحولات حرارية في العينة المختبرة حيث يتم تسجيل هذه التغيرات من قبل الحاسب الآلي ويعمل على إخراجها بشكل منحنى تفاضلي تتوضح فيه الطاقات الممتصة (الاندوثرمية) والمنبعثة (الأكسوثرمية) بشكل قمم نحو الأعلى والأسفل تشير إلى التفاعلات الكيميائية والخصائص الفيزيائية والانتقالات الحاصلة للعينة .
- إن هذا الجهاز يمكن أن يقوم بالتحليل الوزني في نفس الوقت و دراسة التغير الحاصل في وزن المادة كدالة لدرجة الحرارة والزمن خاصة بالنسبة للمواد البو ليميرية حيث يسجل النقص الحاصل في كتلة العينة المفحوصة نتيجة عمليات التحلل وتفكك الروابط وفقدان الماء ... الخ في المنحنى الظاهر على شاشة الحاسب الآلي.



إنّ المنحنى التفاضلي للعينة يتضمن القياسات التالية :

1- نقطة الانصهار ( $T_m$ )

2- درجات التبلور ( $T_c$ ) ونسبة التبلور في العينة

3- درجة حرارة التحول الزجاجي ( $T_g$ )

4- درجات التفاعل الكيميائي

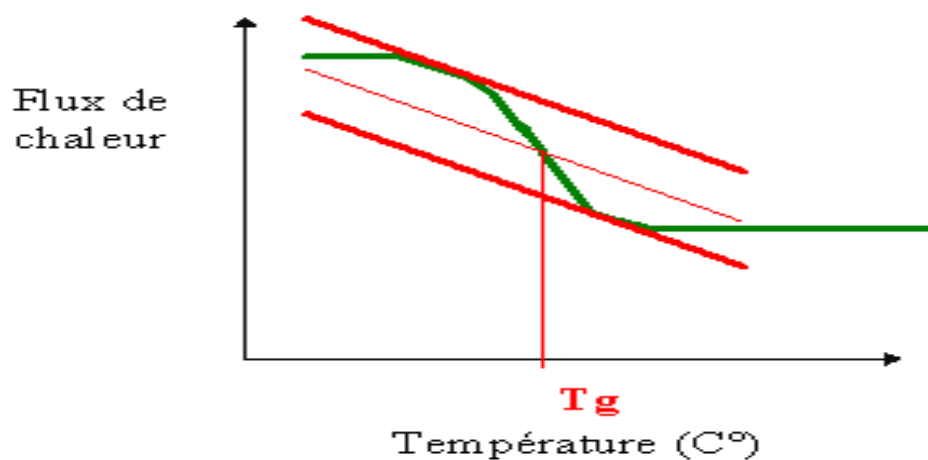
5- الانثالي والسعة الحرارية ( $C_p$ )

6- تحديد نقاوة المواد خاصة الصيدلانية والعضوية

7- استقرارية المواد

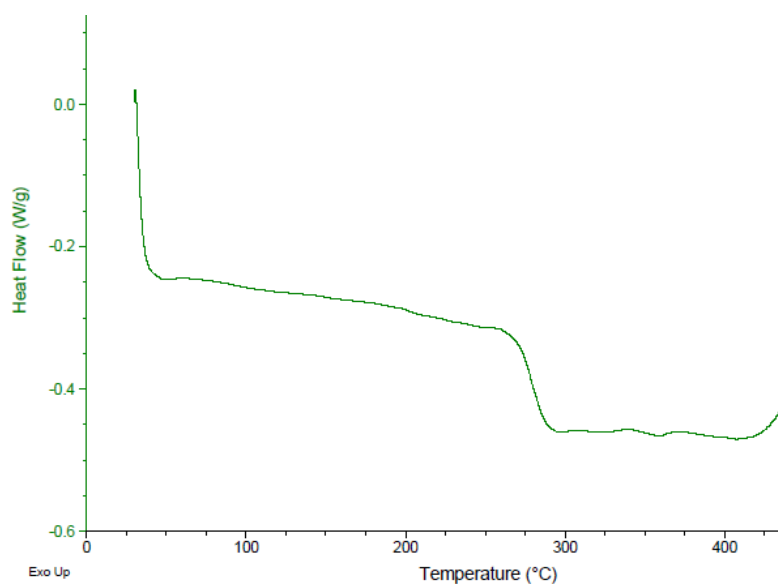
8- التحولات الطورية

عندما نسخن المادة قليلا و بعد درجة حرارة معينة نلاحظ ميل المنحنى فجأة نحو الأسفل كما هو موضح في الشكل الجانبي. وهذا يعني أن التدفق الحراري يزداد والسعة الحرارية للمادة تزداد. وهذا يحدث لأن المادة تمر بطور التحول الزجاجي. وتكون السعة الحرارية للمادة أكبر عندما يسخن فوق درجة حرارة التحول الزجاجي. وبفضل هذا التغير في السعة الحرارية نستطيع استخدام مسعر المسح التبايني لقياس درجة حرارة التحول الزجاجي للمادة ما. كما نلاحظ أن هذا التحول لا يحدث مباشرة وإنما يحدث عند عتبة من درجات الحرارة وهذا يجعل تحديد درجة حرارة التحول الزجاجي  $T_g$  صعباً نوعاً ما. فتستخدم طريقة معروفة لتحديد  $T_g$  تدعى طريقة المماسات وهي موضحة في الشكل التالي.

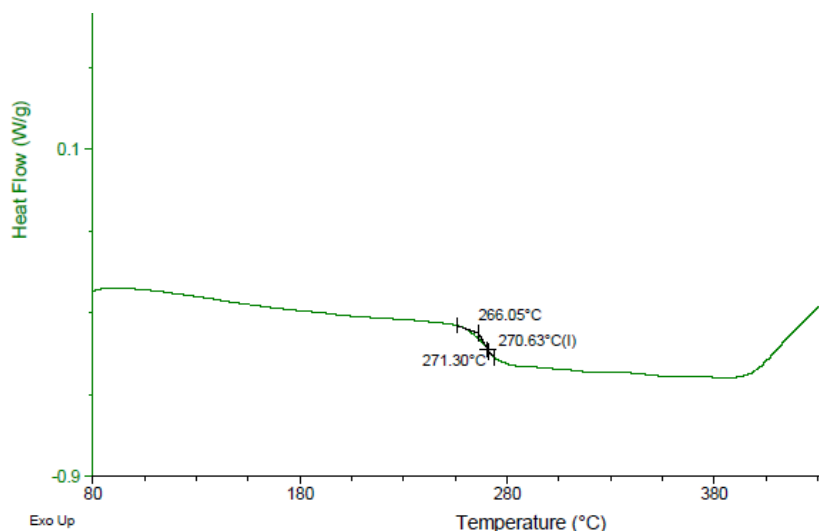


شكل (III-1) طريقة المماسات في الحصول على درجة التحول الزجاجي من منحنى مسعر المسح التبايني

### 2.3 نتائج قياسات درجة حرارة التحول الزجاجي:



شكل III-2 المنحني الناتج عن مسعر المسح التبايني



شكل III-3 تحديد قيمة درجة حرارة التحول الزجاجي  $T_g$  من المنحني الناتج عن مسعر المسح التبايني

### III-4. تعيين مختلف معاملات المرونة: القياسات فوق الصوتية

تمّ تحديد مختلف معاملات المرونة بطريقة القياسات فوق الصوتية التي ذكرناها في الفصل السابق.

### 1.4 قياس سرعات الصوت الطولية والعرضية بواسطة القياسات فوق الصوتية:

الجدول III.2: سرعات الصوت الطولية والعرضية والنسبة بينهما لمختلف العينات

	V longitudinale (m/s)	V transversale (m/s)	$V_l/V_s$
verre 1	4557,35	2424,02	1,88
verre 2	4747,24	2419,36	1,96
verre 3	4352,41	2451,68	1,78
verre 4	4359,90	2296,34	1,90
verre 5	4196,01	2241,77	1,87
verre 6	4214,60	2226,37	1,89
verre 7	4184,57	2341,30	1,79
verre 8	4241,25	2328,54	1,82
verre 9	4155,20	2242,02	1,85
verre 10	4212,20	2388,18	1,76

من خلال الجدول يمكن أن نلاحظ أنّ القيمة  $(V_l/V_s)$  لمختلف تركيبات الزجاج الهالوجينوفوسفاتي المدروسة متواجدة في

المجال بين القيمتين 1.75 و 1.98 ومتوسطها مساوٍ لـ 1.86، وهي من رتبة التغير للزجاج الأكسيدي (1.6 – 2.0)

وأقل من رتبة التغير للزجاج المعدني (1.8 – 2.5 بمعدّل 2.0).

## 2.4 المعاملات المرونية:

المعاملات المرونية تعطي نظرة ماكروسكوبية على صلابة المواد، وتعكس فكرة عن كلٍّ من طبيعة الروابط الذرية والتماسك. وبما أنَّ العديد من المواد بكلِّ أنواع الروابط الذرية (معدنية، تكافئية، شاردية ...) يمكنها أن تشكّل زجاجاً، فإنّ هذه المواد الزجاجية لها بالضرورة معاملات مرونية مختلفة مرتبطة بالتركيب الزجاجي وبخصائص المادة المجهرية.

إنّ معامل يونغ  $E$  هو المعامل الأكثر استعمالاً، والعديد من الجهود قد أُجريت من أجل إيجاد علاقة بين  $E$  ومختلف معاملات المرونة الأخرى مثل  $G$  و  $K$  و  $\nu$ . إنّ إيجاد مثل هذه العلاقات يكون عملياً جدّاً وفعالاً وذلك لأنه يُنقص من عدد معاملات المرونة الواجب قياسها، فباستعمال معامل يونغ، الذي يمكن قياسه ببساطة، يُمكن تقييم مختلف معاملات المرونة الأخرى بسهولة.

## 4-2-1 العلاقة بين معامل يونغ $E$ و المعامل العرضي ( $G$ ) للزجاج الهالوجينوفوسفاتي

الجدول 3.III: العلاقة بين معامل يونغ  $E$  و المعامل العرضي ( $G$ ) للزجاج الهالوجينوفوسفاتي

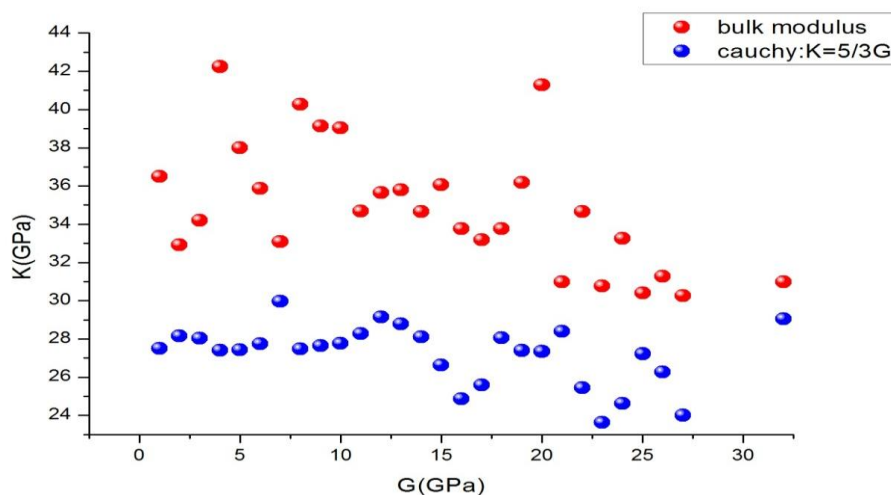
	E(Gpa)	G(Gpa)	E/G
verre 1	42,82	16,44	2,61
verre 2	43,46	16,41	2,65
verre 3	43,19	17,04	2,54
verre 4	39,93	15,26	2,62
verre 5	36,87	14,18	2,60
verre 6	38,62	14,78	2,61
verre 7	41,56	16,33	2,54
verre 8	40,49	15,76	2,57
verre 9	37,29	14,40	2,59
verre 10	44,03	17,43	2,53

نلاحظ من الجدول أنَّ النسبة  $E/G$  للزجاج الهالوجينوفوسفاتي تكون محصورة بين 2.5 و 2.64 بمتوسط 2.59 وهي أقلّ مقارنة مع المعادن البلورية متعدّدة البلّورات ( $E/G = 2.67$ ) ومن رتبة السيراميك النفوذ ( $E/G = 2.56$ ) و أكبر من الزجاج المعدني ( $E/G = 0.261$ ). إنّ هذه النتيجة تُبيّن أنّه بالإمكان تعيين  $E$  أو  $G$  انطلاقاً من معرفة قيمة أحدهما فقط.

#### 2-2-4 العلاقة بين المعامل الجسمي K و المعامل العرضي (G) للزجاج الهالوجينوفوسفاتي (علاقة كوشي)

من أجل جسم صلب متماثل المناحي، فإنّ تصرفه المروني يُمكن أن يُوصف بواسطة المعامل الطولي (L) والمعامل العرضي (G)، كما يمكن وصفه من خلال تعيين أحدهما فقط لأنّهما مرتبطان بالعلاقة :  $L = 3G$ ، كما أنّه توجد علاقة بين K و G تُدعى بعلاقة كوشي، وتعطى بالمعادلة [Ref.] :  $K = \frac{5}{3} G$  وهذا يعني أنّ L و K يساويان 0 عندما يكون G معدوماً.

من أجل معرفة مدى صلاحية علاقة كوشي من أجل الزجاج الهالوجينوفوسفاتي المدروس، فإنّنا قمنا بمقارنة قيم K/G من أجل مختلف تركيبات هذا الزجاج القيم المتحصّل عليها بواسطة علاقة كوشي (الشكل III-3).



شكل III-4 علاقة بين المعامل الجسمي K و المعامل العرضي G (علاقة كوشي)

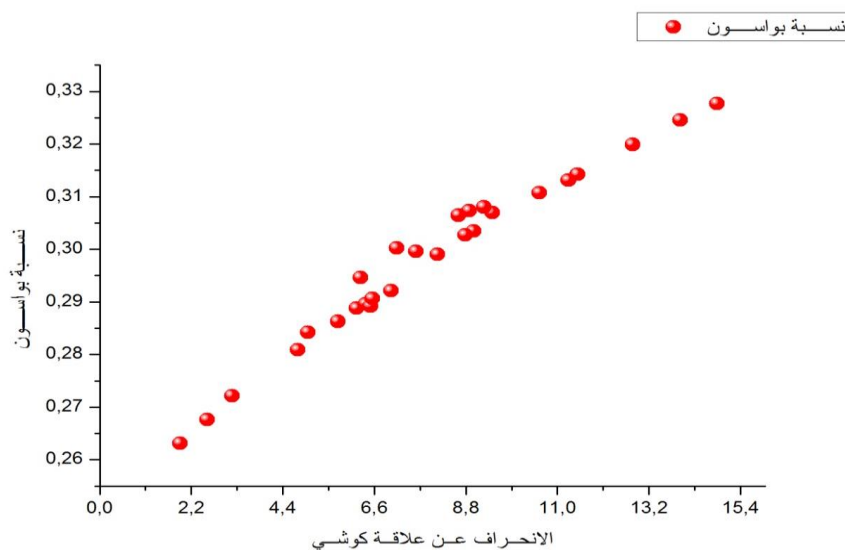
#### 3-2-4 نسبة بواسون :

نلاحظ أنّ العلاقة بين  $K$  و  $G$  تنحرف عن علاقة كوشي، ودرجة الانحراف عن هذه العلاقة ترتبط بعدم انتظام المادّة.

إنّ الانحراف عن علاقة كوشي يبيّن بوضوح الارتباط مع نسبة بواسون للزجاج الهالوجينوفوسفاتي المدروس، إذ نلاحظ من الشكل أنّه كلما كان الانحراف أكبر كانت نسبة بواسون أكبر. تغيّر نسبة بواسون بدلالة الانحراف عن علاقة كوشي يكون خطّيًا، ويمكننا الاستقراء أنّ معادلة التغيّر تكون من الشكل:

$$y = a \cdot x + b$$

حيث  $a = 0.005$  هو ميل الخط المستقيم  $v = f(\Delta)$  و  $b = 0.258$  هي قيمة معامل بواسون عندما يكون الانحراف معدوماً (التقاطع مع المحور  $x=0$ ).



شكل III-5 تغيّر نسبة بواسون بدلالة الانحراف عن علاقة كوشي

#### 4-2-4 العلاقة بين معامل يونغ E والكثافة ( $\rho$ ) للزجاج الهالوجينوفوسفاتي

كما أنّ النسبة  $E/\rho$  تكون محصورة بين 12.00 و 15.50 (الجدول).

الجدول 4.III: العلاقة بين معامل يونغ E والكثافة ( $\rho$ ) للزجاج الهالوجينوفوسفاتي

	E(Gpa)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	E/ $\rho$
verre 1	42,82	2,80	15,31
verre 2	43,46	2,80	15,51
verre 3	43,19	2,83	15,24
verre 4	39,93	2,89	13,80
verre 5	36,87	2,82	13,07
verre 6	38,62	2,98	12,95
verre 7	41,56	2,98	13,95
verre 8	40,49	2,91	13,93
verre 9	37,29	2,87	13,02
verre 10	44,03	3,06	14,41

#### 5-2-4 العلاقة بين معامل يونغ E والصلادة H

معامل يونغ E والصلادة H هما وسيطان أساسيان في هندسة المواد، وعلاقتها ببعضهما البعض لها أهميتها. من الجدول نرى

أنّ النسبة بين E و H في حدود 20 ( $E/H \sim 20$ ) بالنسبة للزجاج الهالوجينوفوسفاتي المدروس.

الجدول 5.III: العلاقة بين معامل يونغ E والصلادة (H) للزجاج الهالوجينوفوسفاتي

	E(Gpa)	H	E/H
verre 1	42,82	2,16	19,81
verre 2	43,46	1,92	22,65
verre 3	43,19	2,64	16,36
verre 4	39,93	1,95	20,44
verre 5	36,87	1,89	19,53
verre 6	38,62	1,91	20,25
verre 7	41,56	2,48	16,75
verre 8	40,49	2,27	17,86
verre 9	37,29	1,97	18,91
verre 10	44,03	2,75	16,00

#### 4-2-6 العلاقة بين درجة حرارة التحول الزجاجي $T_g$ و معامل المرونة $E$ :

الجدول 6.III: العلاقة بين معامل يونغ  $E$  و درجة حرارة التحول الزجاجي ( $T_g$ ) للزجاج الهالوجينوفوسفاتي

	E(Gpa)	$T_g(^{\circ}C)$	E/ $T_g$
verre 1	42,82	251,89	0,17
verre 2	43,46	256,29	0,17
verre 3	43,19	253,70	0,17
verre 4	39,93	264,00	0,15
verre 5	36,87	265,00	0,14
verre 6	38,62	279,00	0,14
verre 7	41,56	271,00	0,15
verre 8	40,49	273,00	0,15
verre 9	37,29	275,00	0,14
verre 10	44,03	271,00	0,16

نلاحظ من خلال قيم درجة حرارة التحول الزجاجي  $T_g$  و قيم معامل المرونة  $E$  في الجدول أن  $T_g$  ترتبط خطيا بـ  $E$

$$E \sim 0.15 T_g$$

#### 4-2-7 العلاقة بين درجة حرارة التحول الزجاجي $T_g$ و المعامل العرضي $G$ :

الجدول 7.III: العلاقة بين درجة حرارة التحول الزجاجي  $T_g$  و المعامل العرضي  $G$

	$T_g(^{\circ}C)$	G(Gpa)	G/ $T_g$
verre 1	251,89	16,44	0,07
verre 2	256,29	16,41	0,06
verre 3	253,70	17,04	0,07
verre 4	264,00	15,26	0,06
verre 5	265,00	14,18	0,05
verre 6	279,00	14,78	0,05
verre 7	271,00	16,33	0,06
verre 8	273,00	15,76	0,06
verre 9	275,00	14,40	0,05
verre 10	271,00	17,43	0,06

نلاحظ من خلال قيم درجة حرارة التحول الزجاجي  $T_g$  و قيم المعامل العرضي  $G$  في الجدول رقم 1 أن  $T_g$  و  $G$

$$G \sim 0.06 T_g$$



#### 4-2-8 العلاقة بين درجة حرارة التحول الزجاجي $T_g$ و درجة حرارة ديباي $\theta_d$ :

انطلاقاً من قيم سرعات الصوت الطولية والعرضية ومن قيم الكتل الحجمية لمختلف العينات محلّ الدراسة، قمنا بحساب درجة حرارة ديباي، ثم قمنا بمقارنتها بدرجة حرارة التحول الزجاجي، وبيّنت النتائج الأولية المجراة على عائلتين من الزجاج أنّ النسبة  $T_g/\theta_d$  تكون ثابتة من أجل كل عائلة من الزجاج، ممّا يعني أنه يمكن التنبؤ بدرجة التحول الزجاجي أو درجة حرارة ديباي انطلاقاً من معرفة أحدهما من أجل عائلة معيّنة، وهي نتيجة سنحاول التحقق منها من خلال دراسة مسحية حول مختلف العائلات الزجاجية.

#### الجدول 8.III: العلاقة بين درجة حرارة التحول الزجاجي $T_g$ و درجة حرارة ديباي $\theta_d$

Verres	$T_g$	$\theta_d$	$T_g$	$T_g/\theta_d$
80NaPO3 – 10ZnF2 - 10 SrF2	251	206,13	524	0,39
79NaPO3 – 10ZnF2 - 10 SrF2-1 Ho	247	204,79	520	0,39
78NaPO3 – 10ZnF2 - 10 SrF2-2 Ho	249	201,44	522	0,39
90NaPO3-9PbCl2-1HoF3	264	260,74	537	0,49
90NaPO3-8PbCl2-1HoF2-1YbF3	265	251,15	538	0,47
80NaPO3-9PbCl2-10BaCl2-1HoF3	279	254,80	552	0,46
80NaPO3-8PbCl2-10BaCl2-1HoF3-	271	254,22	544	0,47
90NaPO3-9PbCl2-1ErF3	273	259,07	546	0,47
90NaPO3-8PbCl2-2ErF3	275	253,90	548	0,46
80NaPO3-9PbCl2-10BaCl2-1ErF3	271	260,51	544	0,48

### III-5 خاتمة :

بيّنت النتائج الأولى وجود علاقات خطية بين معامل يونغ ومختلف المعاملات المرونية وكذا درجة حرارة التحول الزجاجي ، كما أن هناك علاقة خطية بين درجة حرارة التحول الزجاجي ودرجة حرارة ديباي، ومعامل التناسب يكون ثابتا من أجل عائلة معينة من الزجاج.

الخلاصة العلمية

### الخلاصة العامة

هدف هذا العمل هو إيجاد العلاقة بين مختلف المعاملات المرونية من جهة وبينها وبين درجة حرارة التحول الزجاجي من جهة أخرى لعائلتين من الزجاج الهالوجينوفوسفاتي تركيبهما المولي :  $\text{NaPO}_3\text{-PbCl}_2\text{-BaCl}_2\text{:LnF}_3$  و  $\text{NaPO}_3\text{-SrF}_2\text{-ZnF}_2\text{:LnF}_3$ .

من أجل تحقيق هذا الهدف ، قمنا في البداية بدراسة الزجاج وذلك بعرض مفاهيم عامة حوله من حيث تعريفه وأنواعه ومختلف خصائصه ، ثم تعرّضنا إلى خصائصه المرونية بشيء من التفصيل، وذكرنا طرق تحديدها التي من بينها طريقة القياسات فوق الصوتية.

درجات حرارة التحول الزجاج لمختلف العينات المدروسة عيّنت بواسطة مسعر المسح التبايني، ومختلف معاملات المرونة (المعامل الطولي، العرضي، معامل يونغ، نسبة بواسون و درجة حرارة ديباي) عيّنت بواسطة القياسات فوق الصوتية وذلك انطلاقاً من قياس سرعات الصوت الطولية والعرضية.

حاولنا إيجاد علاقات بين مختلف هذه المعاملات المرونية وبينها وبين درجة حرارة التحول الزجاجي، وبينت النتائج وجود ارتباط خطّي في معظم هذه العلاقات.

إن معرفة هذه العلاقات من شأنها أن تُقلّل من عدد المعاملات التي يجب قياسها، كما يمكن استعمالها في التنبؤ وهندسة الزجاج وفق المعايير المطلوبة والمرغوبة.

كآفاق لدراسات مستقبلية، نقترح دراسة مقارنة بين نتائج هذه الدراسة مع نتائج أخرى لأنواع متعددة من الزجاج.

قائمة المراجع

- [1] Azzedine Ayadi, "Technologie du verre", office des publication-Universitaires, Alger, 2004.
- [2] Claude Parent et Josik Portier, « Matériaux non-cristallins- Modèles, propriétés », université de Bordeaux.
- [3] To Thi Thao, Etude par dynamique moléculaire de spectres vibrationnels de verres de silice, Thèse de doctorat, Université de Lille (2007), pp 34-43.
- [4] N. EL Jouhari, Les cristaux ioniques, Université Mohammed V-Agdal, p144, (2007).
- [5] F.Rehouma, "Etude de l'échange d'ions à l'argent dans un verre aluminoborosilicate: Application a un procédé d'enterrage sélectif des guide", Thèse de doctorat, Institut National de Grenoble 1994.
- [6] غوقالي مبروك "نمذجة ومحاكاة ظاهرة التبادل الايوني في الزجاج السيليكاتي القلوي" مذكرة ماجستير، جامعة قاصدي مرباح ورقلة، (2005).
- [7] Virginie Moizan, "Étude de l'amplification laser en bande II dans les fibres de verres chalcogénures", thèse de doctorat, Université Rennes I, 2008.
- [8] Jon Rifkin, XMD - Molecular Dynamics Program, University of Connecticut, 18 Feb 2011.
- [09] جواد كاظم الخفاجي، سلوى القاسم، دمحي رسول حمود ، عماد الرجيلي، محمد المهداوي، الكيمياء الصناعية، جامعة بغداد ، بيت الحكمة ، ( 1988 )
- [10] ال ادم ،كوركيس عبد ،"تكنولوجيا و كيمياء البوليميرات" ، جامعة البصرة ، كلية العلوم، ( 1985 )
- [11] W.H.Wang, "The elastic properties, elastic model and elastic perspectives of metallic glasses", Prog Mater Sci (2011) ,
- [12] H.Slimani, "Elaboration, mesure mecanique et elastique des verres", mémoire de master, université Med khider-Biskre , (2013)
- [13] H.Guezoun, "Etude physic-chimique et spectroscopique de l'ion de cobalt dans les verres", mémoire de magister, université Kasdi merbah-ouargla, (2012)

[14] H.Jaafer, "Effects of fibers on damping behaviors of composites materials", universty Irak of Technology, department of Applied Sciences, (2010)

[15] هند مرعي، "استخدام طريقة الامواج فوق الصوتية المولدة بواسطة الليزر في الاختبارات اللااتلافية"، جامعة دمشق – سوريا ، المعهد العالي للعلوم التطبيقية ، ( 2009 )

[16] M.Baazouzi, "Elaboration et caractérisation des verres d'oxydes à indice de refraction complexe pour application dans l'optique non linéaire", Thèse de doctorat, université Med khider-Biskra , (2014)

[17] <https://ar.wikipedia.org/wiki> ( المسعر الحراري التبايني )

[18] I. Nasser 5/13/2012 Chapter 15 Specific Heat of Solid

## الملخص:

هدف هذا العمل إيجاد العلاقة بين مختلف المعاملات المرنة من جهة وبينها وبين درجة حرارة التحول الزجاجي من جهة أخرى لعائلتين من الزجاج الهالوجينوفوسفاتي تركيبهما المولي :  $\text{NaPO}_3\text{-PbCl}_2\text{-BaCl}_2\text{:LnF}_3$  و  $\text{NaPO}_3\text{-SrF}_2\text{-ZnF}_2\text{:LnF}_3$ . قمنا في البداية بعرض مفاهيم عامة حول الزجاج من حيث تعريفه وأنواعه ومختلف خصائصه. ثم تعرضنا إلى خصائصه المرنة بشيء من التفصيل، وذكرنا طرق تحديدها التي من بينها طريقة القياسات فوق الصوتية. درجات حرارة التحول الزجاج لمختلف العينات المدروسة عيّنت بواسطة مسعر المسح التبايني. مختلف معاملات المرونة عيّنت بواسطة القياسات فوق الصوتية وذلك انطلاقا من قياس سرعات الصوت الطولية والعرضية. حاولنا إيجاد علاقات بين مختلف هذه المعاملات المرنة وبينها وبين درجة حرارة التحول الزجاجي، وبينت النتائج وجود ارتباط خطّي في معظم هذه العلاقات. إن معرفة هذه العلاقات من شأنها أن تُقلّل من عدد المعاملات التي يجب قياسها، كما يمكن استعمالها في التنبؤ وهندسة الزجاج وفق المعايير المطلوبة والمرغوبة.

**الكلمات المفتاحية:** الزجاج الهالوجينوفوسفاتي، القياسات فوق الصوتية، المعاملات المرنة، درجة حرارة التحول الزجاجي

## Résumé :

Le but de ce travail de trouver des relations entre les différents coefficients d'élasticité d'une part, et entre ces coefficients et la température de la transition vitreuse d'autre part, pour deux familles d'un verre halogénophosphaté avec les compositions molaires sont :  $\text{NaPO}_3\text{-PbCl}_2\text{-BaCl}_2\text{:LnF}_3$  et  $\text{NaPO}_3\text{-SrF}_2\text{-ZnF}_2\text{:LnF}_3$ . Au début, On présenter des notions généraux sur le verre, sa définition, ses types et ses propriétés. Puis on a abordé ses propriétés élastique en détail, et on a présenté les méthodes de la détermination de ces propriétés, parmi lesquelles se trouve la méthode des mesures ultrasoniques. Les valeurs de la température de la transition vitreuse on été déterminées à l'aide de DSC. A partir de la mesure des vitesses de son longitudinale et transversale, les différents coefficients d'élasticité sont déterminés. On essayé de trouver des relations entres ces différents coefficients et avec la température de la transition vitreuse, les résultats obtenus montrent une corrélation linéaires dans la plus part de ces relations. La détermination de ces relations nous a permet de diminuer le nombre des coefficients à déterminer, et nous donne un outil pour prédire et optimiser des verres suivant les critères désirées.

**Mots clés :** verre halogénophosphaté, mesure ultrasonore, coefficients élastiques, température de la transition vitreuse.

## Abstract :

The aim of this work is to find a relationship between different elastic coefficients in side, and in other side between these coefficients and the glass transition temperature, for a two families of halogenophosphate glass with molar compositions:  $\text{NaPO}_3\text{-PbCl}_2\text{-BaCl}_2\text{:LnF}_3$  and  $\text{NaPO}_3\text{-SrF}_2\text{-ZnF}_2\text{:LnF}_3$ . in the first, we are presented general notions about glass, its definition, its types and its characteristics. Then we are treated their elastic properties in detail, and we are presented different methods for the determination of these properties, which we find the ultrasonic measurements. The values of glass transition temperature were determined using DSC. Starting from the measure of longitudinal and transversal velocities of son, different elastic coefficients were determined. We were tray to find relationship between different coefficients and between these coefficients and glass transition temperature, and the results shows that there is a linear correlation in the most of these relationship. Determination of these relationships allowed us to reduce the number of coefficients to determined, and give us a tool to predict and design glasses with desired criterion.

**Keywords:** halogenophosphate glass, ultrasonic measurement, elastic coefficients, glass transition temperature.