

Sommaire

Résumé	2
Introduction	3
I. Matériaux polymères	3
I.1. Les thermoplastiques	4
I.2. Les thermodurcissables.....	4
I.3. Les élastomères.....	5
II. Comportement contrainte – déformation	6
II.1. Théorie de l'élasticité	6
II.2. Les caractéristiques mécaniques des polymères :	8
III. Origines physiques des constantes élastiques et influence de la température.....	9
III.1. Origine physique des constantes élastiques.....	9
III.2. Influence de la température	10
IV. Expérimentation : méthodes de mesures du module d'Young.....	12
IV.1. Description de l'essai.....	12
IV.3. Théorie (Anélasticité -modèles)	13
IV.4. Méthode de propagation des ultrasons	15
V. Résultats des constantes élastiques des polyimides (norme ASTM D-882)	15
Conclusion.....	16
VI. Références Bibliographiques.....	17
VII. Documents annexes.....	19

Résumé

Ce travail s'est intéressé aux propriétés élastiques des matériaux polymères, plus particulièrement aux polyimides. Les matériaux polymères ont un module d'élasticité qui ne dépasse pas 7 MPa pour les polymères fortement élastiques. Les polymères rigides atteignent les 4 GPa et leur domaine d'utilisation est compris entre 100°C et 250°C. Les polyimides appartiennent à ce groupe des polymères rigides mais présentent un large domaine d'utilisation compris entre -269°C et 400°C.

La question posée est de voir si le module d'élasticité des polyimides est à l'origine de leur domaine important de travail. Certes certains polymères ont une élasticité non linéaire mais une combinaison entre ressort et amortisseur permet l'étude de leur comportement élastique.

Ce travail a montré que les densités des polyimides qui appartiennent à la famille des thermodurcissables sont bien comprises entre 0,9 et 1,5. Ce sont des matériaux, une fois modifiés conduits à des solides que l'on ne peut plus ramollir par la chaleur. Leur module d'élasticité ont été déterminé par la méthode de test : norme ASTM-882. Il peut atteindre des valeurs de 3100 MPa à une température de 23°C. Il peut atteindre 2760 MPa à une température de 260°C. Aucune différence particulière (par rapport aux autres polymères) n'a été notée sur le module d'élasticité des polyimides par rapport à celui des polymères.

Introduction

Dans notre étude des polymères, on s'intéresse à la détermination des propriétés mécaniques de ces macromolécules. Le module de Young et le coefficient de Poisson ainsi que les autres paramètres qui s'en déduisent comme le module de Coulomb G et le module de compressibilité K seront déterminés. La plupart des caractéristiques mécaniques des polymères varient beaucoup en fonction de la vitesse de déformation de la température et de la nature chimique du milieu (présence d'eau, d'oxygène, de solvants organiques etc.). Ces caractéristiques sont parfois nécessaires pour la mise en forme du matériau.

Pour le cas des polyimides on note une plage de travail très large, comprise entre

- 269 et 400°C. Nous allons nous intéresser à leur élasticité pour voir si leurs effets est à l'origine de ce comportement spécifique.

Un simple essai de traction permet de déterminer ces paramètres mais on note de légères modifications des éprouvettes et des machines de traction par rapport aux métaux. Des méthodes non destructives de vibrations ou par ultrasons seront décrites. L'intérêt des matériaux macromoléculaires réside dans leur faible densité (comprise entre 0,9 et 1,5) [1] et leur facilité de mise en œuvre.

I. Matériaux polymères

Les polymères sont des matériaux constitués de molécules de grande dimension (macromolécule) construites par répétition d'un motif monomère[1]. La polymérisation est basée sur deux procédés : condensation et addition. La polycondensation est la réaction entre corps à plusieurs fonctions pour former des macromolécules avec élimination d'une petite entité en général l'eau et la polyaddition est une répétition d'un très grand nombre de molécules insaturées (monomères) [2,3]. Un monomère est une suite d'atomes de carbone liés entre eux et avec d'autres éléments (H, N, Si, Cl,...). La structure d'un polymère est linéaire et/ou ramifiée, à liaisons transversales ou réticulées. Les polymères sont classés en fonction de leurs propriétés en trois catégories : les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères[1,2].

I.1. Les thermoplastiques

Les thermoplastiques (Fig. 1a) se ramollissent à chaud et peuvent être moulés en conservant leur forme après refroidissement. **Ce sont des macromolécules linéaires constitués de longues chaînes de molécules reliées par des liaisons covalentes fortes et éventuellement des liaisons latérales faibles de Van der Waals ou hydrogène**[1,3]. Plusieurs polymères [polyméthacrylate de méthyle (PMMA), polyamide 6 (PA 6), polyamide 6-6 (PA 6-6 ou nylon), polyéthylène (PE), polystyrène (PS),...] sont classés dans les thermoplastiques. Les polymères thermoplastiques sont soit amorphes (polycarbonate PC, PS, PMMA ; acrylonitrile butadiène styrène ABS,...) et ne présentent pas d'arrangement intermoléculaires ou interatomiques à longue distance ; soit semi-cristallin (PE, polypropène PP, le nylon, ...) et possèdent des zones cristallines et amorphes [4,5]. Le taux de cristallinité varie de 20% à 80% en fonction des produits. Le polyétheréthercétone (PEEK) par exemple: est cristallin à 30% et amorphe à 70%. Quant un thermoplastique est chauffé, il se ramollit et se transforme en liquide plus ou moins visqueux. Cependant ; les polymères amorphes chauffés passent de manière progressive d'un état solide à un état fluide sans palier de changement d'état. La température à laquelle il est possible de réaliser les opérations de moulage est appelée température de transition vitreuse (T_v). Les polymères semi-cristallins présentent un palier de changement d'état à une température de fusion (T_f) qui correspond à la désorganisation de la cristallite. La plage de travail d'un polymère est le domaine de température où les chaînes sont mobiles les unes par rapport aux autres et permettant le moulage [2]. Elle est comprise entre de 100°C à 250°C environ. Les thermoplastiques peuvent être refondus et remodelés un grand nombre de fois tout en conservant leurs propriétés. A l'exception du polyamide, ils sont insensibles à l'humidité et aux parasites, et peuvent être fabriqués dans une gamme de couleurs très étendue. Cependant, les thermoplastiques ont un fluage et un coefficient de dilatation linéaire élevés : ce sont des combustibles. Ils sont insensibles aux UV et aux électrostatiques. Les thermoplastiques ont des propriétés qui varient énormément avec la température [6].

I.2. Les thermodurcissables

Les thermodurcissables ou thermorigides tridimensionnels (Fig.1b) [2,4] sont constitués de molécules formant un réseau d'espace désordonné avec des liaisons covalentes. Ce sont des polymères qui, lors de leur formation, deviennent de plus en plus dur au fur et mesure qu'on les chauffe. Cette modification chimique est irréversible et conduit à un solide

que l'on ne peut plus ramollir par la chaleur [1-4]. Les thermodurcissables sont généralement fragiles. Leur module d'élasticité (E) est compris entre 3 000 et 10 000 MPa et leur résistance à la rupture (σ_R) varie entre 25 et 80 MPa. Dans ce groupe, peuvent être classés les polyesters, polyépoxydes, polyimides, phénoliques,.... [5,7]. Ils résistent bien aux températures élevées (supérieur à 200°C) [6], aux attaques chimiques et présentent une meilleure résistance au fluage que les thermoplastiques. Cependant leur mise en œuvre est moins pratique et plus lente.

I.3. Les élastomères

Les élastomères peuvent être considérés comme une famille supplémentaire de polymères qui sont obtenus par synthèse chimique et se sont caractérisés par une très grande élasticité longitudinale [6]. Ils ont les mêmes propriétés que les caoutchoucs naturels et sont constitués de longues chaînes moléculaires repliées sur elles mêmes au repos [2]. C'est le cas des molécules de butadiène, acrylonitrile, éthylène-acétate de vinyle, polychloroprène, Pour un bon déploiement de ses chaînes sans les faire glisser, ni supprimer leur flexibilité, le caoutchouc doit être vulcanisé. Contrairement à leur grande élasticité longitudinale, les élastomères présentent un module d'élasticité (E) très petit (inférieur à 10N/mm²) [6] ; traduisant une faible rigidité [7] et une très grande ductilité.

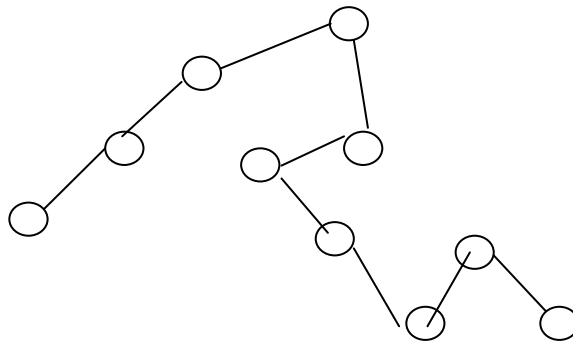


Figure 1a : Schémas d'une macromolécule linéaire

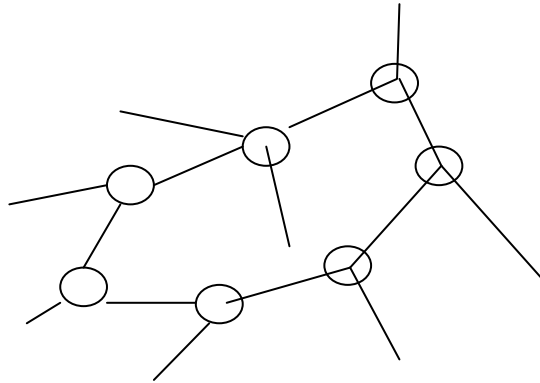
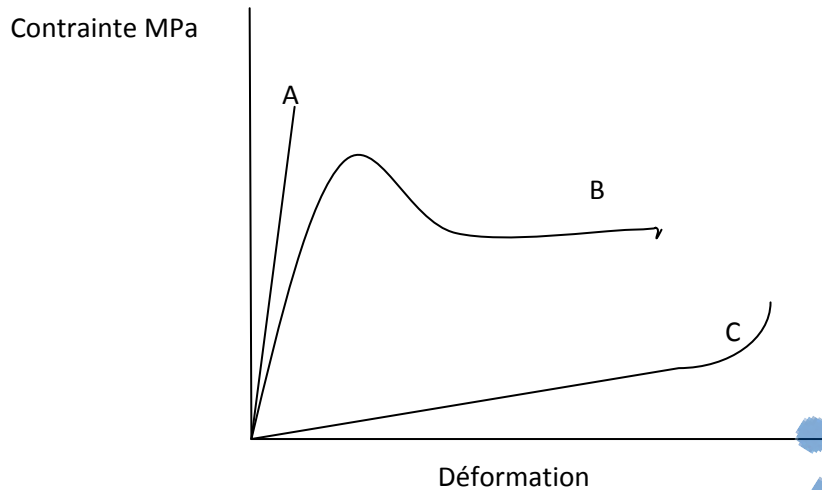


Figure 1b : Schémas d'une macromolécule tridimensionnelle

II. Comportement contrainte – déformation

II.1. Théorie de l'élasticité

La théorie de l'élasticité étudie la relation entre les déformations subies par un objet et les forces qui lui sont appliquées. Le comportement élastique d'un matériau correspond à de petits déplacements réversibles des atomes autour de leur position d'équilibre. Sous l'action d'une force, les atomes peuvent s'écarter [1,8]. Cette réaction est provoquée par des forces de liaison qui tendent à les rapprocher. Dans le cas des matériaux métalliques et des polymères non étirés et non renforcés, les caractéristiques d'élasticité sont indépendantes de la direction et leur comportement élastique est linéaire. Ce n'est pas le cas pour les composites ou certains polymères pour lesquels le module de Young varie avec l'amplitude de la déformation du fait de l'orientation de la macromolécule. Ce comportement correspond à des lois d'élasticité non linéaire [1]. Le module de Young E (extension uniaxiale), le module de cisaillement G (cisaillement simple) et le module de compressibilité volumique K (compression uniforme) sont les comportements élastiques que l'on peut déterminer pour l'étude d'un certain type de déformations simples [8]. A l'instar des métaux, on prévoit trois types de comportement pour les polymères (Fig. 2). La courbe A illustre le comportement fragile dont la rupture s'accompagne d'une déformation élastique. La courbe B montre le comportement des polymères plastiques avec les différents stades : une partie élastique suivie d'une partie plastique et de la rupture. La courbe C correspond à une déformation entièrement élastique même avec une contrainte très faible ; c'est-à-dire que le polymère est très ductile (cas des élastomères) [9].

**Figure 2 : Courbes contrainte – déformation**

- La courbe A montre le comportement fragile d'un thermodurcissable.
- La courbe B celle d'un polymère plastique avec ses différents stades.
- La courbe C celle d'un élastomère qui est entièrement élastique.

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques de quelques polymères à la température ambiante
(Modern Plastics Encyclopedia McGraw Hill 1995)

Matériau	Masse spécifique (g/cm ³)	Module de Young (GPa)	Limite d'élasticité (MPa)	Allongement à la rupture (%)
Polyéthylène (faible densité)	0,917 – 0,932	0,17-0,28	9,0-14,5	100-650
Polyéthylène (haute densité)	0,952-0,965	1,06-1,09	26,2-33,1	10-1200
Polychlorure de vinyle	1,30-1,58	2,4-4,1	40,7-51,7	40-80
Polytétrafluoroéthylène	2,14-2,20	0,40-0,55	-	200-400
Polypropylène	0,90-0,91	1,14-1,55	31,0-37,2	10-600
Polystyrène	1,04-1,05	2,28-3,28	-	1,2-2,5
Polyméthacrylate de méthyle	1,17-1,20	2,24-3,24	53,8-73,1	2,0-5,5
Phénol formaldéhyde	1,24-1,32	2,76-4,83	-	1,5-2,0
Nylon6-6	1,13-1,15	1,58-3,80	44,8-82,8	15-300
Polyester	1,29-1,40	2,8-4,1	59,3	30-300
Polycarbonate	1,20	2,38	62,1	110-150

Les propriétés mécaniques des polymères se distinguent de celle des métaux. Ainsi, le module de Young des polymères fortement élastiques ne dépasse pas 7 MPa, tandis que celui

des polymères rigides atteint 4 GPa. Pour les métaux, les valeurs sont plus grandes et comprises entre 48 GPa et 410 GPa [10]. L'allongement des polymères avant rupture dépasse largement les 100 %, contrairement aux métaux [1].

II.2. Les caractéristiques mécaniques des polymères :

Les caractéristiques mécaniques des polymères se modifient en fonction de la structure et des conditions de sollicitations c'est-à-dire en **fonction de la température et de la vitesse de déformation** [11,12]. Une augmentation de la température entraîne une diminution du module d'élasticité et une hausse de la ductilité : cas du polyméthacrylate de méthyle (plexiglas). **La vitesse de déformation** joue également un rôle important. En général toute réduction de la vitesse de déformation a la même influence qu'une augmentation de température c'est-à-dire que le matériau devient plus mou et plus ductile [13].

Il est très important de bien comprendre l'origine physique de la déformation des polymères pour non seulement prévoir et expliquer les mécanismes de déformation et élaborer des modèles rhéologiques ; mais aussi dans l'objectif de fabriquer des matériaux avec des propriétés mécaniques optimales.

Dans un solide la distance moyenne (d) entre deux atomes s'établit à une valeur (d_0) fonction de la nature de liaison (fig.3). Si on impose aux atomes un déplacement au voisinage de leur position d'équilibre, la force d'interaction les rappelle à la distance d_0 (sauf dans le cas d'un écartement au-delà de d_d , distance de dissociation des atomes). De telles déformations nécessitent donc l'application d'une force extérieure pour vaincre la force de rappel et sont réversible lorsque cette force extérieure est supprimée [14].

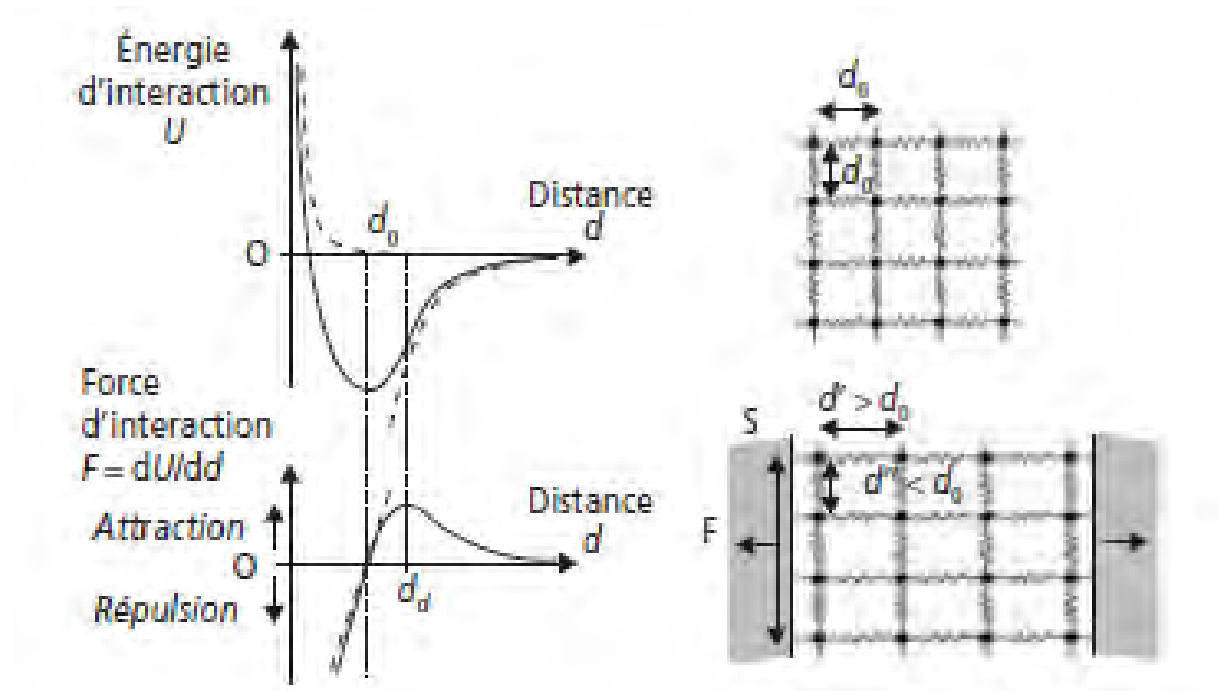


Figure 3 : Courbe de la variation de l'énergie d'interaction et de la force d'interaction entre deux atomes en fonction de leur distance d.

De part et d'autre de la distance d'équilibre d_0 la force de rappel est approximativement proportionnelle à l'écart $d-d_0$. Aux atomes voisinage de leur position d'équilibre, la force d'interaction les rappelle à une distance d_0 .

III. Origines physiques des constantes élastiques et influence de la température

III.1. Origines physiques des constantes élastiques

En fonction de la structure on aura essentiellement une **origine électronique** due aux forces interatomiques (liaisons covalentes entre les atomes d'une chaîne macromoléculaire, liaisons hydrogènes ou de Van der Waals entre les macromolécules : réticulation), en concurrence avec **une origine entropique** due au désordre des chaînes des macromolécules. Ainsi les covalents ont de forts modules d'élasticité d'origine électronique. En effet, si d est la distance entre deux atomes proches, une expérience de traction entraîne une variation d'énergie libre :

$$dG = \sigma d\varepsilon = dU - TdS$$

d'où

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{d^2U}{d\varepsilon^2} - T \frac{d^2S}{d\varepsilon^2}$$

- Pour les métaux et céramiques : $\frac{d^2U}{d\varepsilon^2} \gg T \frac{d^2S}{d\varepsilon^2}$

Le module de Young E est donné par la courbure de U (d) au voisinage de d₀.

- Dans le cas des polymères la stabilité structurale en fonction de la température et les effets entropiques seront déterminants. C'est le cas du caoutchouc (Fig.4 et Fig.5) ou matériaux désordonnés (terme entropie S prépondérant).

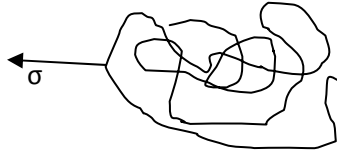


Figure 4 : Polymère non étiré



Figure 5 : Polymères étirés

$$E \approx -T \frac{d^2S}{d\varepsilon^2}$$

III.2. Influence de la température

Les propriétés mécaniques des polymères dépendent largement de la température (Fig. 6). À basse température, la plupart des polymères présentent un état vitreux : ils sont rigides [11]. La réticulation et la présence ou non de cristallites modifient considérablement la sensibilité à la température des polymères.

Deux catégories apparaissent : les polymères thermostables et les thermoplastiques. Les **polymères thermostables** comme les résines phénoliques ont un module d'élasticité qui décroît régulièrement quand la température augmente : c'est le cas pour les solides cristallins. Ces matériaux sont polymérisés dans toutes les directions, des liaisons covalentes formant un réseau tridimensionnel.

En revanche, les **thermoplastiques** présentent une baisse de plusieurs ordres de grandeur du module d'élasticité à une température de transition vitreuse (T_g). Ces polymères sont formés de chaînes reliées entre elles par des liaisons de Van der Waals. Ces dernières ne jouent plus de rôle au dessus de T_g, quand l'agitation thermique est suffisante. Les chaînes de monomères peuvent alors se déplacer facilement les unes par rapport aux autres et le matériau présente un comportement caoutchoutique. Ces polymères peuvent présenter un degré de cristallisation plus ou moins prononcé.

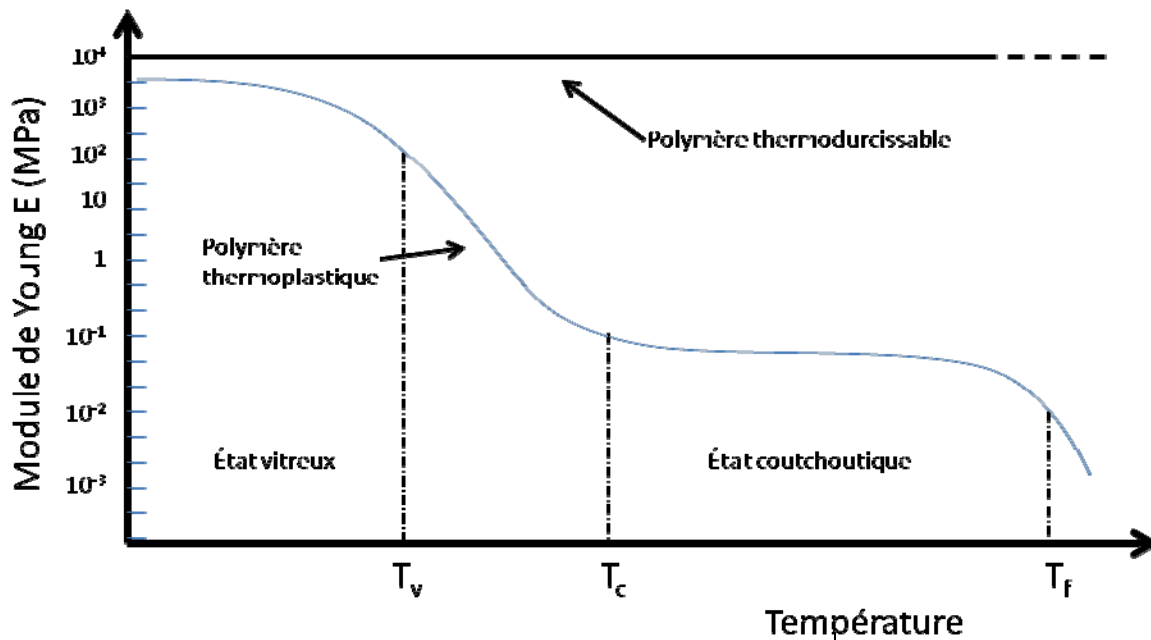


Figure 6 : Module de Young en fonction de la température.

Le module de Young (Fig. 6) montre quatre stades différents :

- (i) Le stade 1 qui correspond à l'état vitreux rigide et amorphe ;
- (ii) le stade 2 qui montre une phase de transition et représente l'état réticulé semi-cristallisé ;
- (iii) le stade 3 qui correspond à l'état caoutchoutique et
- (iv) le stade 4 qui représente l'état de fluide visqueux.

Dans le domaine 1, la déformation résulte essentiellement d'une extension des liaisons. Elle est éventuellement accompagnée de rotations de petits groupes moléculaires latéraux (ramifications), d'où le comportement fragile (exemple : PMMA).

Pour les métaux, la température agit sur la distance interatomique initiale d_0 (dilatation) et sur la courbure de la courbe $U(d)$ avec une variation de E qui est de l'ordre de :

$$\frac{1}{E} \frac{dE}{dT} \approx 6.10^{-4} \quad \text{à} \quad 8.10^{-4} / \text{deg } ^\circ\text{C}$$

Certains **effets magnétiques** tels que la magnétostriction (variation de dimension sous champ magnétique) ou la perte de magnétisme au point de Curie, agissent sur les caractéristiques élastiques (exemple : Invar, Elinvar ...).

IV. Expérimentation : méthodes de mesures du module de Young

Il existe différentes méthodes de mesures des constantes élastiques telles que l'extensométrie (mécanique, optique, électrique), les techniques de rayons X, les manipulations de vibrations et par ultrasons (propagation des ondes).

Dans cette étude l'option est faite sur la méthode extensométrie. Pour cette méthode, les machines de traction sont les plus couramment utilisées (méthode de test : norme ASTM D-882).

IV.1. Description de l'essai

Un extensomètre (Fig.7) mesure l'allongement de l'éprouvette et l'effort. Les capteurs sont des dispositifs transformant des grandeurs physiques (contrainte, déformation) observées en une grandeur utilisable (signal électrique). Ce sont les éléments de base du système d'acquisition de données. Les éprouvettes de traction sont normalisées et leur dimension diffère selon l'épaisseur du produit à tester.

IV.2. Principe de l'essai

C'est un essai destructif que l'on fait à une température donnée. Elle consiste à imposer une déformation croissante à vitesse constante et à mesurer l'effort nécessaire pour déformer le matériau [15]. Le résultat est visualisé sur un écran ou une table traçante par un système d'acquisition de données.

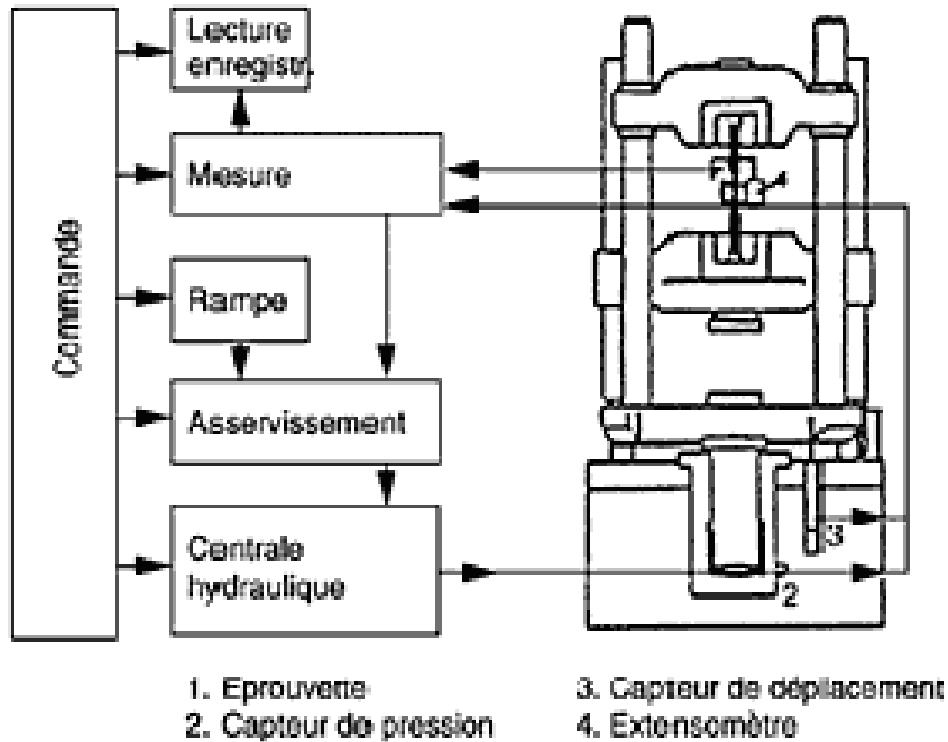
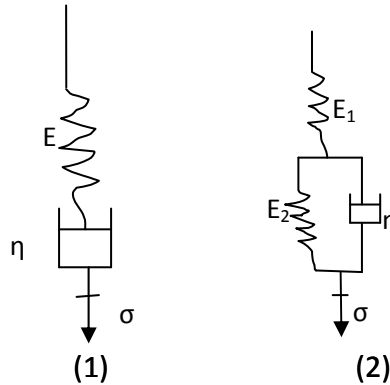


Figure 7 : Machine de traction [15]

IV.3. Théorie (Anélasticité -modèles)

L'élasticité (linéaire ou non) suppose l'absence d'effets d'amortissement ou d'atténuation d'ondes, c'est-à-dire l'absence de déphasage entre contraintes et déformation. Il n'y a donc pas de dissipation d'énergie. La façon la plus simple de traduire l'existence d'une énergie dissipée est d'introduire dans la loi de comportement du matériau un terme de "frottement" (viscosité) sous la forme $\sigma = \eta \dot{\epsilon}$ où σ représente la contrainte due au frottement, η est le coefficient de viscosité et $\dot{\epsilon}$ correspond à la vitesse. La juxtaposition de cette composante de frottement (solide de Newton) et d'une composante élastique (solide de Hooke) conduit à des lois de comportements de la forme : $(\sigma, \dot{\sigma}, \ddot{\sigma}) = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, \ddot{\epsilon})$ [8,13] .

Exemples de modèles : solide de Maxwell (1) et solide de Zener (2).



(1) Solide de Maxwell : $\sigma + \tau \dot{\sigma} = E \dot{\epsilon} \tau$ avec $\tau = \frac{\eta}{E}$

(2) Solide de Zener : le comportement du modèle de Zener correspond à un comportement d'un thermodurcissable.

$$\sigma + \tau_\epsilon \dot{\sigma} = E_R (\epsilon + \tau_\sigma \dot{\epsilon}) \text{ avec } \tau_\epsilon = \frac{\eta}{E_1 + E_2} \quad \tau_\sigma = \frac{\eta}{E_2} \quad E_R = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2}$$

- Si l'élasticité est instantanée : le temps (t) est très court (où la fréquence (f) très élevée), seul le ressort E_1 intervient. Le module d'élasticité est égal à E_1 .

- Si l'élasticité est retardée : t long (où basse f), le correspond au ressort E_1 et E_2 en série. $E_R = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2}$. Le module d'élasticité est relaxé [10].

- t et f intermédiaire, comportement viscoélastique.

- Pour une déformation réversible : pour relaxation on a : $E(t) = E_R + \Delta E \cdot e^{-t/\tau_\epsilon}$
 $\Delta E = E - E_0$

En fonction du modèle choisi et du mode de sollicitation on calcule l'énergie dissipée et le module de Young.

Dans le cas de la propagation des ondes la vitesse de propagation est proportionnelle à $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$, ρ étant la masse volumique du matériau et E , le module de Young.

Ces modèles sont simples à analyser et permettent de comprendre comment et pourquoi un changement structural dans le polymère influence la réponse.

Une combinaison de ces modèles (ressort et amortisseurs) permet de décrire les polymères et de donner une réponse au comportement de ces matériaux [8].

IV.4. Méthode de propagation des ultrasons

Pour mesurer le module de Young, un signal électrique est transformé en onde de déformation par un transducteur piézoélectrique en quartz. Cette onde se propage dans l'échantillon puis se réfléchit et refait le chemin inverse. On mesure le temps (t) entre deux échos successifs sur l'oscilloscope et on en déduit la vitesse (v) des ondes ultrasonores :

$$v = 2 \frac{e}{t}, \quad e \text{ étant épaisseur de l'échantillon.}$$

L'utilisation de transducteur qui génère des ondes longitudinales ou transversales de vitesses respectives v_L et v_T permet de remonter aux constantes élastiques du matériau

(E = module de Young, G = module de cisaillement, K = module de compressibilité uniforme et ν = coefficient de Poisson) [10]. Les vitesses sont données et on détermine les constantes élastiques où vice-versa. En appliquant le principe fondamental de la dynamique si le matériau est soumis à une contrainte on peut aboutir aux équations de propagation. Ainsi pour les solides élastiques isotropes on peut en déduire les formules suivantes :

$$G = \rho v_T^2, \quad K = \rho \left(v_L^2 - \frac{4}{3} v_T^2 \right)$$

$$\nu = \frac{v_L^2 - 2v_T^2}{2v_L^2 - v_T^2} \quad E = \rho v_T^2 \frac{3v_L^2 - 4v_T^2}{v_L^2 - v_T^2} = 2\rho v_T^2 (1 + \nu)$$

V. Résultats des constantes élastiques des polyimides

Les résultats suivants sont issus d'une machine de test traction : **norme ASTM D-882**

Le tableau ci-dessous présente une partie des résultats sur les constantes élastiques des polyimides. Les résultats détaillés sont montrés dans le tableau en annexe (Cf. documents annexes) :

Tableau 2 : Résultats des constantes élastiques des polyimides et leur densité

Matériaux	ρ en g.cm ⁻³	E en MPa	ν	K en MPa	G en MPa
type 1 (Kapton)	1,43	3100 (à 23°C)	0,41	5741	1100
		1700 (à 260°C)	0,34		
polyimideType 2	1,33	3000 (à 23°C)			
		2760 (à 260°C)			

Les polyimides sont des polymères très résistants à haute température. Ils sont classés selon deux types. Le type 1 est le plus ancien ; c'est le film Kapton. Il est obtenu par frittage d'une poudre à haute température et à forte pression. Il n'est pas possible de le modifier

ensuite car les températures de ramollissement et de décomposition sont très proches. On obtient un composé amorphe possédant une certaine cristallinité par étirage. La température de transition vitreuse est mal définie et varie entre 360°C et 410°C. Ces composés possèdent également une bonne résistance mécanique et chimique.

Le type 2 (marque japonaise AURUM) plus récent est semi-cristallin et thermoplastique.

Les films de Kapton (marque déposée DuPont) sont utilisés avec un domaine de température étendu compris entre -269°C et 400°C. On peut les utiliser comme substrats, rubans pour câbles, supports de circuits intégrés très souples, isolants de transformateurs, protection en milieu agressif ou ionisant...

Conclusion

Dans le domaine de la science et du génie des matériaux, la connaissance de la structure du matériau et de ses propriétés physico-chimiques guide son choix en plus de la facilité d'usinage et de son coût.

Le module d'élasticité des polyimides n'a aucune spécificité par rapport aux autres polymères. Il ne permet donc pas de justifier leur large domaine de travail.

Cependant, pour une traction complète il existe un domaine élastique, un domaine plastique et une rupture. Il serait intéressant de pousser l'étude dans le domaine plastique pour mieux comprendre les mécanismes de déformation.

VI. Références Bibliographiques

- [1] http://mediamef.utt.fr/modules/P1/M1-2/.../Caracteristiques_materiaux.pdf,
CARACTERISTIQUES ET CHOIX DES MATERIAUX. 1 Généralités. 11 Propriétés mécaniques des matériaux. 111 Propriétés d'usage. 112 Essai de Traction.
- [2] Étude des propriétés optiques des nanocristaux du semi-conducteur CdS dispersés dans des films minces du polymère polystyrène et de la silice SiO₂ (Mémoire de magister). Barkahoum, H. (2006). Université Mentouri. Mauritanie.
- [3] <http://www.metaux.ulg.ac.be/Fichierpourtelech/polym/ch%202.pdf> *PHYSIQUE DES MATÉRIAUX : PARTIE. POLYMÈRES. Pr. J.Lecomte-Beckers. Chapitre 2 : Distinction des polymères. 1.*
- [4] <http://www.auguste-piccard.ch/pages/TM-PDF/TM2009/TM2009Eriksson.pdf>
Gymnase Auguste Piccard. NOV | 09. Lausanne. Travail de Maturité de. Michael Eriksson. Elève de la classe 3M7. Sous la direction de Jean-Robert Yersin. P.
- [5] [http://fr.wikiversity.org/.../Introduction_à_la_science_des_matériaux/Les polymère...](http://fr.wikiversity.org/.../Introduction_à_la_science_des_matériaux/Les_polymère...)
24 mars 2013 – Introduction à la science des matériaux/Les polymères - Propriétés générales. Une page de Wikiversité. Introduction à la science des matériaux.
- [6] <http://liberty.1.free.fr/.../Structure%20et%20Proprietes%20des%20Polymeres.p...> L.P. M.C.A. Module Plasturgie D.GRIDAINE 2009-2010. Page 1. Structure et propriétés des polymères. Licence Méthodes et Conceptions Avancées. CH. CH2.
- [7] http://master.dgm.ens-cachan.fr/Documents/cours_1_2_3_MSM14_poly.pdf, de O HUBERT - MASTER SCIENCES DE L'INGÉNIEUR ... MSM14. Olivier HUBERT. Professeur des Universités. École Normale supérieure de ... LMT-Cachan (ENS de Cachan - CNRS (UMR 8535) - Université Paris 6). 61 Avenue du Président Wilson, 94235 Cachan, France. ... 1 CHAPITRE 1 - COHESION, LIAISONS ET MATERIAUX. 10.
- [8] <http://www.metaux.ulg.ac.be/Fichierpourtelech/polym/ch%202.pdf>, *PHYSIQUE DES MATÉRIAUX : PARTIE. POLYMÈRES. Pr. J.Lecomte-Beckers. Chapitre 2 : Distinction des polymères 1.*
- [9] Physique de l'état solide, Ch. Kittel, Dunod, 2008.
- [10] Matériaux, Propriétés, Applications et Conception M.F. Ashby, D. RH Jones Dunod 2008.
- [11] Étude des propriétés optiques des nanocristaux du semi-conducteur CdS dispersés dans des films minces du polymère polystyrène et de la silice SiO₂ (mémoire de

magister) Rabah, F. (thèse de Docteur), (2012). Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou. Algérie.

- [12] <http://www.metaux.ulg.ac.be/Fichierpourtelech/polym/ch%208.pdf>, *PHYSIQUE DES MATÉRIAUX : PARTIE POLYMÈRES. Pr. J. Lecomte-Beckers. Chapitre 8 : Propriétés mécaniques. I.* Page 2. *CHAPITRE 8 : PROPRIÉTÉS.*
- [13] *Résistance des Matériaux* P. Agati, F. Lerouge, M. Rossetto, Dunod 2008.
- [14] *Aide mémoire science des matériaux* M. Dupeux, Dunod, Paris 2005.
- [15] http://vsncq.free.fr/IMG/pdf/11_Essai_de_Traction.pdf 11 *Essai de Traction.doc* du 06/09/10. 1/16. V.S. *Essai de Traction. I.* Étude des caractéristiques classiques.

VII. Documents annexes

Table 1: Physical Properties of DuPont™ Kapton® HN at 23°C (73°F)

Property	Unit	1 mil 25µm	2 mil 50µm	3 mil 75µm	5 mil 125µm	Test Method
Ultimate Tensile Strength						
at 23°C, (73°F)	psi	33,500(231)	33,500(231)	33,500(231)	33,500(231)	ASTM D-882-91, Method A*
at 200°C (392°F)	(MPa)	20,000(139)	20,000(139)	20,000(139)	20,000(139)	
Ultimate Elongation						
at 23°C, (73°F)	%	72	82	82	82	ASTM D-882-91, Method A
at 200°C (392°F)	%	83	83	83	83	
Tensile Modulus						
at 23°C, (73°F)	psi	370,000 (2.5)	370,000 (2.5)	370,000 (2.5)	370,000 (2.5)	ASTM D-882-91, Method A
at 200°C (392°F)	(GPa)	290,000 (2.0)	290,000 (2.0)	290,000 (2.0)	290,000 (2.0)	
Density	g/cc	1.42	1.42	1.42	1.42	ASTM D-1505-90
MIT Folding Endurance	cycles	285,000	55,000	6,000	5,000	ASTM D-2176-89
Tear Strength-propagating (Elmendorf), N (lbf)		0.07 (0.02)	0.21 (0.02)	0.38 (0.02)	0.58 (0.02)	ASTM D-1922-89
Tear Strength, Initial (Graves), N (lbf)		7.2 (1.6)	16.3 (1.6)	26.3 (1.6)	46.9 (1.6)	ASTM D-1004-90
Yield Point at 3%						
at 23°C, (73°F)	MPa	69 (10,000)	69 (10,000)	69 (10,000)	69 (10,000)	ASTM D-882-91
at 200°C (392°F)	(psi)	41 (6,000)	41 (6,000)	41 (6,000)	41 (6,000)	
Stress to produce 5% elong.						
at 23°C, (73°F)	MPa	90 (13,000)	90 (13,000)	90 (13,000)	90 (13,000)	ASTM D-882-92
at 200°C (392°F)	(psi)	61 (9,000)	61 (9,000)	61 (9,000)	61 (9,000)	
Impact Strength at 23°C, (73°F)	N•cm• (ft lb)	78 (0.58)	78 (0.58)	78 (0.58)	78 (0.58)	DuPont Pneumatic Impact Test
Coefficient of Friction, kinetic (film-to-film)		0.48	0.48	0.48	0.48	ASTM D-1894-90
Coefficient of Friction, static (film-to-film)		0.63	0.63	0.63	0.63	ASTM D-1894-90
Refractive Index (sodium D line)		1.70	1.70	1.70	1.70	ASTM D-542-90
Poisson's Ratio		0.34	0.34	0.34	0.34	Avg. three samples, elongated at 5, 7, 10%
Low temperature flex life		pass	pass	pass	pass	IPC-TM-650, Method 2.6.18

Table 2: PRODUCT DATA AURUM® PL450C Thermoplastic Polyimide

TYPICAL PROPERTIES	TEST METHOD	UNITS	VALUE
PHYSICAL			
Specific Gravity	ASTM D-792	—	1.33
Mold Shrinkage	ASTM D-955	%	0.83
Water Absorption 24 hrs @ 73°F	ASTM D-570	%	0.34
Moisture Absorption, 24 Hrs.	73°F, 60% RH	%	0.24
MECHANICAL			
Tensile Strength 73°	ASTM D-638	psi (MPa)	13,370 (92)
300°F	“	“	8,400 (58)
Elongation 73°F	ASTM D-638	%	90
300°F	“	“	90
Flexural Strength 73°F	ASTM D-790	psi (MPa)	19,900 (137)
300°F	“	“	12,800 (88)
Flexural Modulus 73°F	ASTM D-790	psi (MPa)	426,800 (2,940)
300°F	“	“	369,900 (2,550)
Izod Impact Strength (notched)	ASTM D-256	ft lb/in (J/m)	1.7 (90)
Compressive Strengt 73°F		psi (MPa)	17,360 (120)
300°F	JIS K-7208		11,100 (76)
Youngs Modulus	“	“	400,000 (2,760)
	ASTM D-882	psi (MPa)	
THERMAL			
Melt Point	DSC	°F (°C)	730 (388)
Glass Transition Temperature	DSC	°F (°C)	482 (250)
Melt Flow Index 752°F, 2.3 lbs.	ASTM D-1238	g/10 min	4.5~7.5
Coefficient of Thermal Expansion (MD/TD) 73°F	ASTM D-696	10-5 /°F (10-5/°C)	3.0/3.0 (5.5/5.5)
Heat Deflection Temperature Thermal Conductivity	ASTM D-696		
Specific Heat 73°F	ASTM D-648	°F (°C)	460 (238)
212°F	ASTM C-177	Kcal/m hr °C	0.15
572°F	DSC	Cal/g °C	0.24
	“	“	0.24
	“	“	0.34
ELECTRICAL			
Dielectric Constant 1KHz	ASTM D-150	—	3.2
1MHz	“	—	3.1
Dissipation Factor 1KHz	ASTM D-150	—	0.0009
1MHz	“	—	0.0034
Surface Resistivity Volume Resistivity “	ASTM D-257	Ohm	E17~E18
		Ohm cm	E17~E18
FLAMMABILITY			
Vertical Burn Test 0.4 mm	UL-94	—	V-0
2.0 mm	—	“	5VA
Oxygen Index 3.2 mm	ASTM D-2863	%	47