

II. 3 Mécanismes d'endommagement et de rupture :

II. 3. 1 Introduction :

Les essais physiques et mécaniques des polymères sont une partie essentielle du processus de leur développement. Ces essais permettent de savoir quand le polymère est endommagé ou quand une rupture peut se produire. On doit garantir une conformité du matériau aux exigences de l'industrie. Cela s'applique, entre autres, aux industries aérospatiales, automobiles, grand public, médicales et de défense.

L'un des essais universels pratiqués est l'essai de traction. Les polymères lorsqu'ils sont soumis à un essai de traction, présentent les comportements suivants :

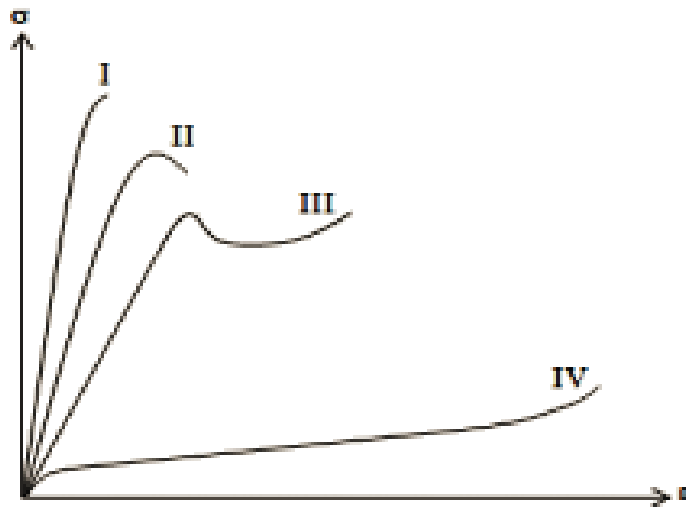


Figure 1 : Courbes contraintes- déformation typique des polymères

La courbe I décrit le comportement d'un polymère fragile. S'il est chargé dans son domaine élastique linéaire, il retourne à son état initial lors du déchargement. Les polymères thermodurcissables fortement réticulés ont ce genre de comportement.

La courbe II représente le comportement de la plupart des thermoplastiques et des thermodurcissables testés à une température très inférieure à T_g . Ces polymères possèdent un domaine élastique linéaire suivi d'un domaine plastique restreint.

La courbe III représente le comportement de la plupart des thermoplastiques et des thermodurcissables testés à une température proche de T_g . Le domaine plastique grandit. Le polymère s'étire et lors de cet étirement, les chaînes macromoléculaires du polymère s'alignent avec la direction de la sollicitation. Cette réorientation rend le polymère plus résistant, d'où la seconde augmentation de la contrainte au sein du matériau.

la courbe IV décrit un comportement d'élasticité non linéaire mais réversible. Celui-ci est dû aux liaisons covalentes entre les chaînes qui assurent la mémoire de l'état initial du polymère. C'est le cas des élastomères.

Remarque : Plusieurs courbes contrainte-déformation peuvent être associées au même polymère si on change la température et la vitesse de sollicitation,

Exemple : Essai de traction sur le PMMA

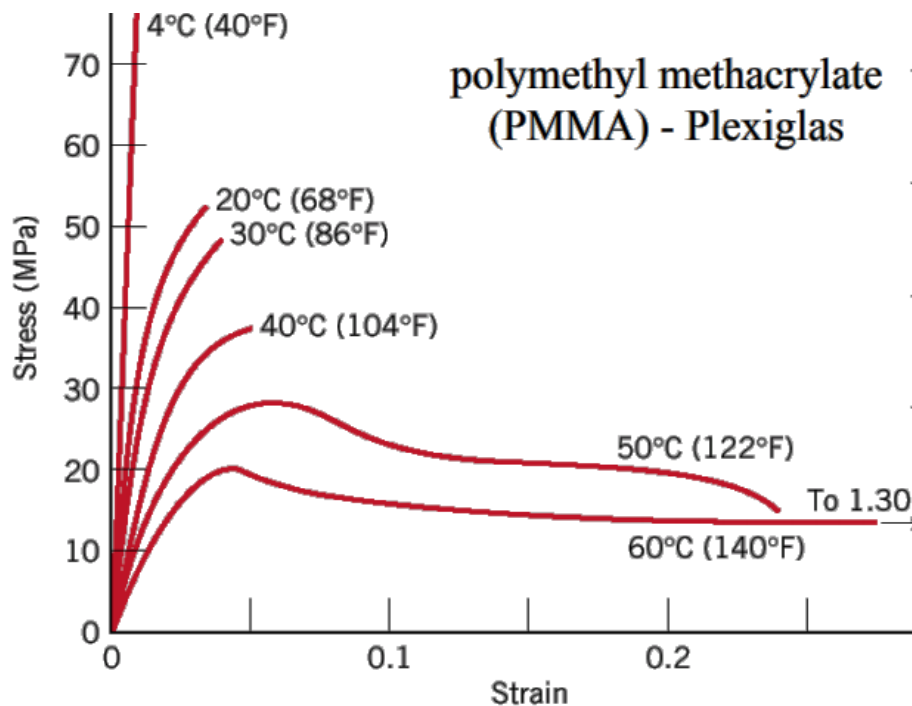


Figure 2 : Influence de la température sur la courbe contrainte-déformation du PMMA

A basse température, le polymère est vitreux. Pour des températures inférieures à 40°C, le PMMA a un comportement viscoélastique faiblement plastique, voire fragile. Il devient caoutchouteux aux températures intermédiaires. Lorsque la température augmente au-delà de 40°C, le PMMA s'étire fortement et son domaine plastique est prépondérant.

De la même manière, moins la vitesse de déformation est élevée, plus la déformation plastique du polymère est importante.

II. 3. 2 Mécanismes d'endommagement :

La conséquence principale de la sollicitation des pièces en polymères est leur dégradation. La théorie de l'endommagement consiste à regarder l'impact de cette dégradation sur les propriétés mécaniques sans toutefois, quantifier les microfissures au sein du matériau. Elle permet donc de connaître le comportement d'un matériau en traction en faisant intervenir le coefficient d'endommagement D , défini comme suit :

$$D = 1 - \frac{S}{S'} = 1 - \frac{E}{E'}$$

Où : S' et E' sont respectivement la section et le module d'élasticité du matériau avant endommagement et : S et E sont respectivement la section et le module d'élasticité du matériau endommagé.

En se basant sur le principe d'équivalence en déformation, on définit une contrainte équivalente σ appliquée au matériau de section S et de module E qui donnerait la même déformation que la contrainte σ' réellement appliquée au matériau de section S' et de module E' .

L'expression de Barbero permet de relier la contrainte à la déformation dans les conditions suivantes:

Avec : $F_R = 2E' \cdot \varepsilon_{cr}$

- Si: $\varepsilon > \varepsilon_0$

$$\sigma = \left(1 + \frac{E' \varepsilon_0}{F_R - F_0}\right) \cdot E' \cdot \varepsilon - \frac{E'^2}{F_R - F_0} \cdot \varepsilon^2$$

- Si $\varepsilon < \varepsilon_0$,

la contrainte devient : $\sigma = E' \cdot \varepsilon$

Le point (ε_0, F_0) correspond au début de l'endommagement, c'est-à-dire au passage du domaine élastique au domaine plastique. ε_{cr} est la déformation au moment où la contrainte au sein du matériau est maximale.

II. 3. 3 Rupture des polymères :

La rupture des polymères est produite suite à la naissance de bandes de cisaillement et de craquelures dans les zones amorphes du matériau.

II. 3. 2. 1 Les bandes de cisaillement :

Les bandes de cisaillement (Fig.3), constituées de chaînes polymériques très étirées proviennent d'une déformation plastique locale du matériau à cause de son hétérogénéité. Elles apparaissent aux points où la contrainte de cisaillement est maximale. Elles sont orientées d'un angle de 45° par rapport à la direction de sollicitation pour les polymères amorphes, et d'un angle proche de 45° pour les polymères semi-cristallins.

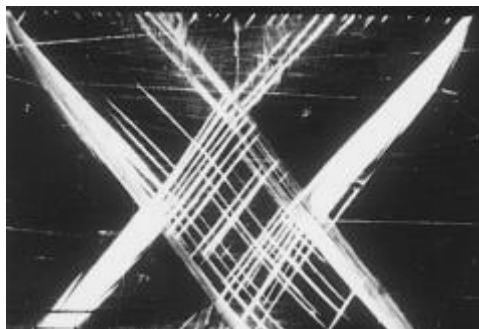


Figure 3: Bandes de cisaillement dans du PS à 20°C sollicité en compression

Sur la courbe contrainte-déformation, ce phénomène se traduit par une chute brutale de la contrainte une fois que la charge maximale σ_m est atteinte. Ces bandes de cisaillement sont à l'origine du phénomène de striction et peuvent engendrer une rupture rapide du matériau ou bien se propager de proche en proche et élargir, ainsi, le domaine de striction à une plus grande partie de l'éprouvette.

Remarque : Les bandes de cisaillement sont plus présentes lors d'une sollicitation en compression qu'en essai de traction.

II. 3. 2. 1 Les craquelures :

Les craquelures (Fig. 4) sont des microfissures perpendiculaires à la direction de sollicitation. Leur épaisseur, mesurée dans la direction de la contrainte principale, est de quelques micromètres tandis que leur largeur peut varier de quelques micromètres à quelques millimètres. Les craquelures sont formées de microvides, qui occupent 50 à 80% du volume de la craquelure, et de fibrilles.

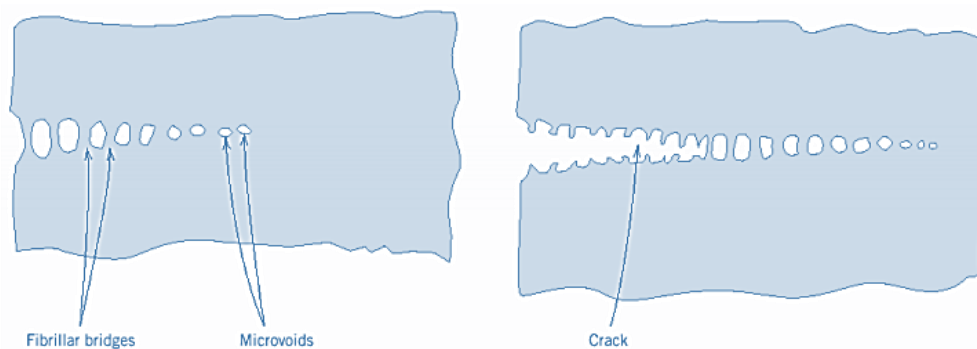


Figure 4: Fissures et craquelures présentes dans un polymère

Le polymère plastifie à l'extrémité d'une craquelure car celle-ci est soumise à de fortes contraintes. A ce niveau, il adopte un comportement de type liquide, permettant l'écoulement de la matière et la création de nouvelles fibrilles ce qui conduit à une propagation de la craquelure perpendiculairement à la direction de sollicitation. L'ouverture d'une craquelure, quant à elle, peut se faire de deux façons :

- Par fluage des fibrilles : les fibrilles s'allongent et s'amincissent ;
- Par alimentation des fibrilles : apport de matière aux bords de jonction des fibrilles. Une craquelure se transforme en micro fissure lorsque les fibrilles se rompent. La création et la propagation de fissures peut conduire à la rupture des pièces en polymères.

Ces deux phénomènes se produisent dans les phases amorphes des polymères, qu'ils soient totalement amorphes ou semi-cristallins. Cependant, il existe dans les polymères semi-cristallins, des mécanismes de déformation préliminaires.

Déformation des polymères semi-cristallins

Dans les polymères semi-cristallins, les lamelles cristallines augmentent la rigidité des chaînes macromoléculaires. Lors de l'allongement du matériau, les lamelles cristallines vont s'orienter dans la direction de sollicitation. Les chaînes des zones amorphes vont ensuite commencer à s'étirer jusqu'à ce que les zones cristallines se séparent en plusieurs blocs. Enfin, les chaînes amorphes se désenchevêtrent et s'étirent parallèlement à la direction de traction (Fig. 5).

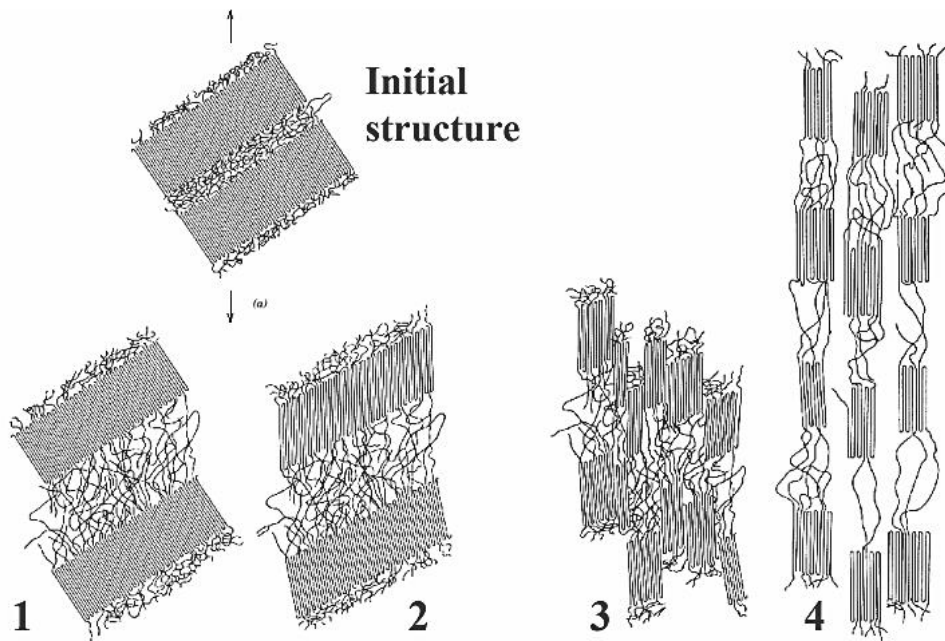


Figure 5: Mécanismes de déformation des polymères semi-cristallins

II. 3. 4 Fatigue :

Le phénomène de fatigue correspond à l'endommagement ou à la rupture du matériau soumis à une charge plus faible que la charge maximale que peut supporter un matériau en statique. Afin de prévoir la durée de vie et le comportement en fatigue d'un matériau, plusieurs tests peuvent être effectués dont le plus courant est l'essai de traction à charge imposée. Dans cet essai, on soumet une éprouvette de traction à une charge cyclique (sinusoïdale, carrée, triangulaire,...) jusqu'à la rupture ou encore, jusqu'à un nombre de cycles défini au préalable (Fig. 6).

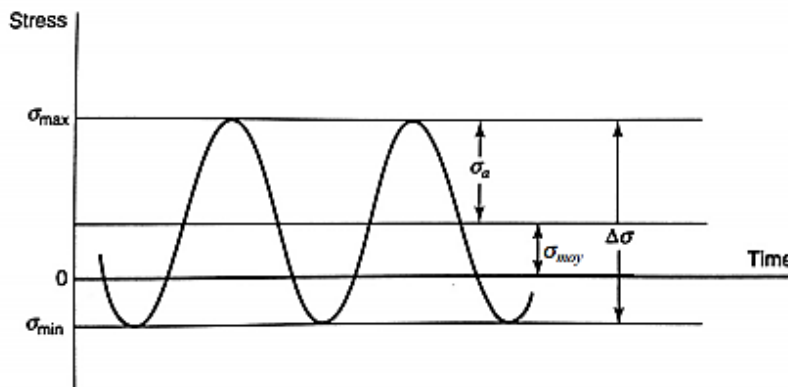


Figure 6 : Paramètres d'un essai de fatigue

L'amplitude du signal σ_a , la contrainte moyenne σ_{moy} et le rapport de charge R sont données, respectivement, par :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad , \quad \sigma_{moy} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad \text{et} \quad R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

- Si $R > 1$, il s'agit d'une compression,
- Si $0 < R < 1$, il s'agit d'une traction,
- Si $R < 0$, il s'agit d'une traction-compression alternées.

Le comportement en fatigue d'un matériau est déterminé en représentant la courbe de Wöhler dite courbe S-N (Fig. 7).

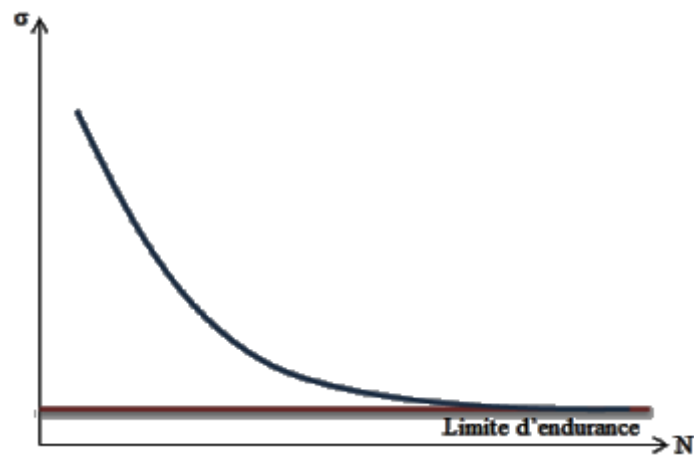


Figure 7 : Allure de la courbe S-N

La plupart des polymères présentent une limite d'endurance c'est-à-dire une contrainte sous laquelle le matériau a une durée de vie en fatigue illimitée.

Comme en statique, et en traction, les craquelures sont le mécanisme prédominant de la rupture en fatigue. Celle-ci passe par les étapes suivantes :

- Création d'une craquelure à partir d'une hétérogénéité ;
- Propagation de la craquelure à chaque cycle augmentant ainsi le volume du vide ;
- Une fois que le volume du vide atteint une valeur critique, la craquelure ne peut plus supporter la contrainte imposée, les fibrilles se rompent et la fissure est initiée ;
- La craquelure s'agrandit jusqu'à ce que la contrainte soit de nouveau trop élevée pour être supportée par les fibrilles, qui se rompent. Cette étape se répète plusieurs fois, engendrant la propagation lente de la fissure et faisant apparaître des cercles concentriques, espacés, sur le faciès de rupture (Fig. 8).
- La contrainte et le volume de vide permettent à la fissure de se propager à chaque cycle, La fissure se propage alors rapidement ;
- Très vite, le matériau ne peut plus supporter la charge imposée et la rupture fragile et complète survient alors.

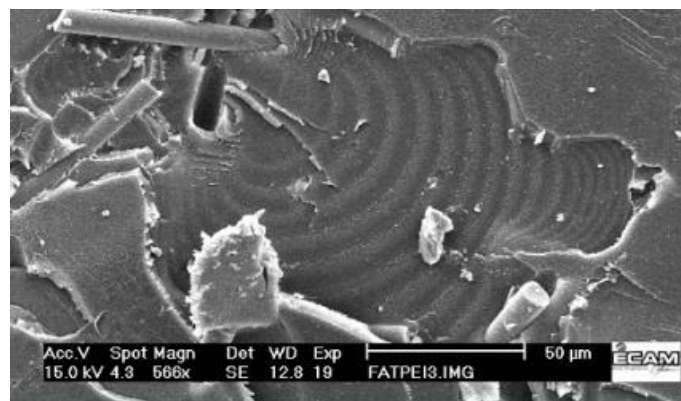


Figure 8 : Rupture en fatigue d'un bouchon en polymère

II. 3. 4. 1 Effet hystérésis :

Les polymères sont très sensibles à la température. En effet, une élévation de température, même faible, provoque une modification non négligeable des propriétés mécaniques. Au cours d'une sollicitation cyclique, le polymère dissipe de l'énergie sous forme de chaleur. A faible fréquence, cette chaleur est transmise suffisamment rapidement au milieu ambiant pour que la température au sein du matériau reste constante. En revanche, si la fréquence est trop élevée, un échauffement local, puis étendu, peut se produire et créer un phénomène appelé l'effet hystérésis. Celui-ci modifie la nature de la rupture qui passe alors d'une rupture mécanique (initiation et propagation d'une fissure) à une rupture thermique (fusion du matériau). Il est donc important de mener les essais de fatigue sur les polymères à faible fréquence afin de s'assurer que la rupture est mécanique.

Références

- [1] Etienne, S., et L. David. 2012. Introduction à la physique des polymères - 2e éd. Dunod.
- [2] Hertzberg, R.W., R.P. Vinci et J.L. Hertzberg. 2012. Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, 5th Edition. John Wiley & Sons, Incorporated.