



Etudes et caractérisation thermomécaniques d'endommagement et de rupture des éprouvettes en acrylonitrile butadiène styrène ABS

A. En-naji¹, N. Mouhib^{1,2}, M. Lahlou¹, and M. El Ghorba¹

1 Laboratoire de Contrôle et Caractérisation Mécanique des Matériaux et des structures, B.P 8118, Oasis-Route El Jadida – ENSEM / Casablanca, Maroc

2 ISEM/ Institut Supérieur des Etudes Maritimes, Km 7 Route El Jadida Casablanca Maroc

E-Mail: abdenaji14@gmail.com; mouhib.nadia@gmail.com; lahloumohammed89@gmail.com

Résumé :

Dans ce travail nous nous intéressons à étudier l'influence de la température sur le comportement mécanique d'un polymère amorphe, l'acrylonitrile butadiène styrène "ABS", à partir d'une série des essais de traction uni axial à différents degrés de température sur des éprouvettes lisses.

Les résultats montrent que le comportement des polymères dépend fortement de la température, il ne faut pas nier son influence sur les caractéristiques physiques lors de l'étude de comportement des polymères, plus précisément lorsqu'il s'agit de l'étude des procédés de mise en forme qui nécessitent un apport important en chaleur et en effort mécanique. Pour cela, la présente étude consiste à prédire l'évolution du dommage d'ABS dans deux zones principales.

La première est la zone industrielle dont la configuration des chaînes macromoléculaires est largement immobile, la température est au dessous de la température vitreuse $T_g=110^{\circ}\text{C}$. Dans cette zone, un modèle de dommage basé sur les résultats expérimentaux obtenus nous a permis de déterminer trois stades d'évolution de dommage et par la suite pouvoir préciser la fraction de vie critique à partir de laquelle le matériau devient instable et défectueux, et ce pour une maintenance prédictive.

La deuxième zone est celle de thermoformage dont la température est au-dessus de la température vitreuse T_g . Dans cette zone les chaînes macromoléculaires ont tendance à se déplacer plus librement au fur et à mesure que la température augmente. Le même modèle de dommage a été adopté pour suivre le processus d'écoulement en fonction de la fraction de vie qui représente le paramètre matériel critique.

Cette étude comprend également une comparaison entre les modèles de dommage statique (expérimentaux) et les modèles de dommage par théorie unifiée (théoriques).

Mot clé : ABS, Essais de traction, Température, Comportement mécanique, Endommagement, Ecoulement, Fiabilité.

1. Introduction

Les matériaux Polymères utilisés dans les industries présentent une combinaison précieuse de propriétés, telles que: la Résistance à la corrosion, haut module d'élasticité et rigidité en ce qui concerne leur densité, bonne isolation thermique et électrique, Excellente conception de forme et formabilité [1]. Le comportement mécanique des polymères est caractérisé par une très grande diversité apparente. En effet, pour les mêmes conditions d'utilisation, et d'un point de vue technologique, on peut trouver des polymères qui sont, soit rigides, fragiles, soit ductiles, soit caoutchoutiques. Ainsi, dans la famille des polymères, on peut retrouver un grand nombre de types de comportement : viscoélastique, viscoplastique, hyper élastique, durcissant, endommageable. Cette diversité se retrouve, pour un même polymère, si l'on fait varier certaines de ses caractéristiques, ou simplement ses conditions d'utilisation. Il peut être rigide fragile, ductile ou élastique etc. Ceci ne veut pas dire que le comportement d'un polymère est variable, voire incontrôlé. Ce sont les paramètres contrôlant son comportement et les processus élémentaires envisageables qui sont nombreux [2]. Parmi ces polymères, l'Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS) est un Polymère amorphe fabriqué par émulsion ou polarisation en masse d'acrylonitrile et de styrène en présence de polybutadiène [3]. Les propriétés les plus importantes de l'ABS par lesquelles il est reconnu sont sa bonne tenue aux chocs, sa résistance à la rayure, son aptitude au vieillissement, son excellent aspect et sa capacité à être décoré. L'ABS est composé de trois monomères: l'acrylonitrile, le butadiène et les styrènes [4]. C'est le matériau privilégié pour le prototypage rapide, il s'agit des pièces moulées pour fabriquer les appareils électroménagers, les jouets, les pièces automobiles et le matériel informatiques. Le prototypage rapide intègre trois notions essentielles : le temps, le coût et la complexité des formes [5]. Ce travail est consacré d'une part à l'étude de l'influence de la Température sur le comportement mécanique de l'ABS, d'autre part sur l'évaluation de l'évolution de l'endommagement par le biais des deux expressions de dommage découlant de la théorie unifiée, à savoir le dommage expérimental et celui théorique dans la zone industrielle et la zone de mise en forme.

2. Matériel et méthodes

Le matériau utilisé dans ce travail est l'Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS). Ce dernier est un polymère amorphe fabriqué par émulsion ou polymérisation en masse d'acrylonitrile et de styrène en présence de polybutadiène.

La géométrie et les dimensions de l'éprouvette utilisée est donnée par la figure 1 selon la norme ASTM D638-03[6]

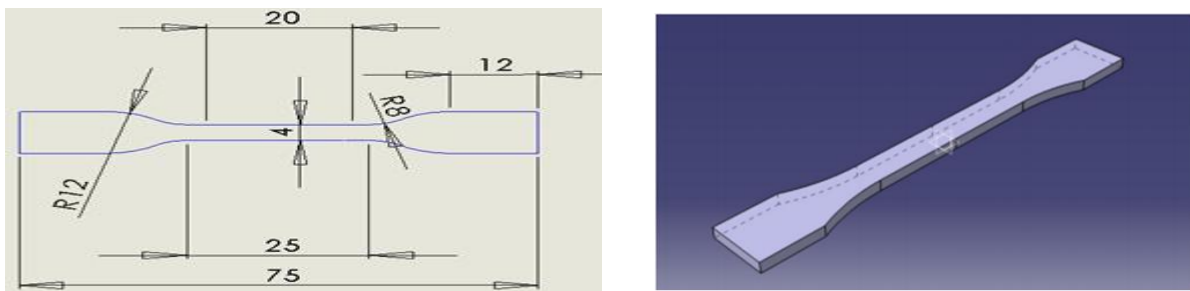


Figure 1 : dimensions des éprouvettes selon la norme ASTM D638-03[6]

La figure 2 présente l'évolution de la Contrainte appliquée sur les éprouvettes (en MPa) en fonction de la déformation ε (en %). L'allure générale de cette courbe a mis en évidence un comportement ductile.

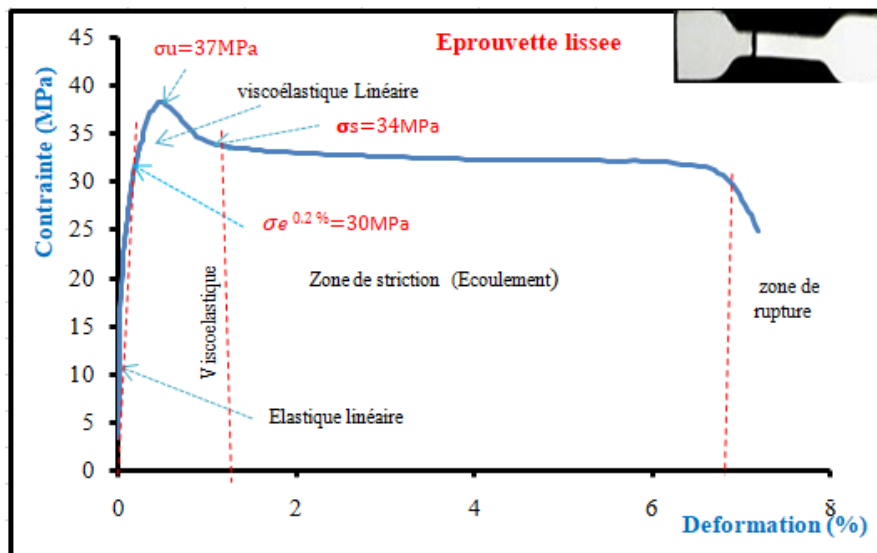


Figure 2: Courbe de traction Contrainte-Déformation Eprouvette haltère

Nous notons à partir de la figure 2 que la courbe a 4 zones. Chacune de ces zones révèle un comportement mécanique particulier du matériau (ABS) lors de l'essai de traction.

Zone 1 (linéaire): c'est la déformation élastique réversible du matériau due à la phase amorphe.

Zone 2: la force diminue, c'est le début de la striction qui correspond à une déformation hétérogène du matériau

Zone 3: augmentation de la zone de striction le long de l'échantillon jusqu'à la stabilisation.

Zone 4: la force d'étirement augmente, la déformation redevient homogène grâce à un durcissement structural lié à l'orientation des chaînes macromoléculaires dans le sens de l'étirement et à l'augmentation de la fraction fibrillaire du matériau jusqu'à rupture

Les résultats présentés sur la figure 2 nous ont permis de déterminer les propriétés mécaniques du matériau étudié.

Parmi ces propriétés, nous avons la limite élastique, le module d'élasticité et la contrainte de striction qui ont été donnés dans le tableau 1

Tableau 1: les propriétés mécanique d'un matériau en ABS

Module d'élasticité	la limite élastique	Allongement à la rupture en traction	Contrainte de striction
E= 2000 MPa	$\sigma_e = 30\text{MPa}$	6 ,4%	$\sigma_s = 34\text{ MPa}$

3. Résultats et Discussion

3.1. Effet de la température sur le comportement de l'ABS

Pour tenir compte de l'influence de la température sur les caractéristiques mécaniques de l'ABS spécialement la contrainte en fonction des températures plusieurs séries d'essais ont été faites sur des éprouvettes haltères dans une plage de température allant de 25°C température de labo jusqu'à 170°C en passant par la température de transition vitreuse $T_g=110^\circ\text{C}$.

La figure 3 présente l'évolution de la Contrainte ultime (MPa) en fonction de la température ($^\circ\text{C}$).

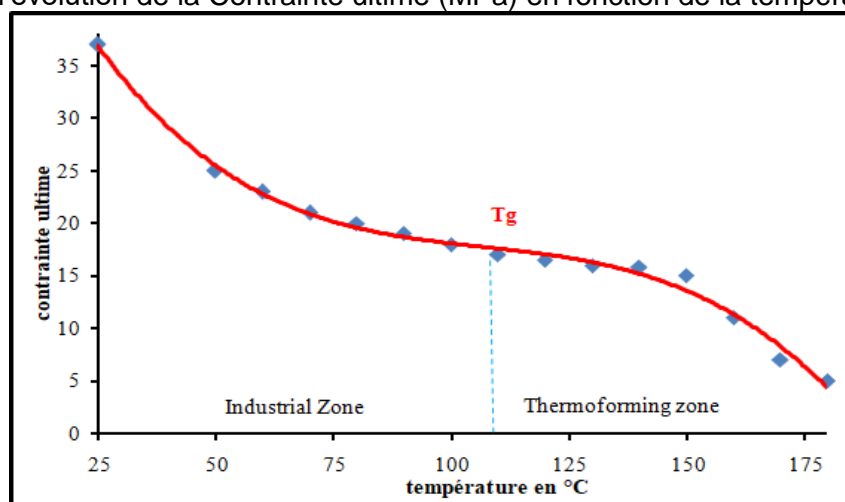


Figure 3 : Evolution de la contrainte ultime en fonction de la température

Nous avons constaté l'existence de deux zones : La zone I qui correspond à la température qui se situe entre la température de labo $T_a=25^{\circ}\text{C}$ et la température de transition vitreuse $T_g=110^{\circ}\text{C}$ correspondant à un état rigide (vitreux) c.-à-d. les molécules de la partie amorphe sont peu déformable (zone industrielle). La zone II est au-dessus de la température vitreuse peut correspondre à un état de transition dans laquelle les mouvements des chaînes deviennent possibles dans les zones désormais amorphes, et permettant des déformations plus importantes et plus faciles : les propriétés mécaniques chutent dans cette phase, c'est-à-dire que le comportement mécanique des polymères est affecté il s'agit d'une zone de mise en forme.

3.2 Détermination du dommage statique

3.2.1 Détermination du dommage statique dans la zone industrielle (25°C à 110°C)

Le modèle du dommage statique consiste à déterminer l'évolution de la contrainte en fonction de la fraction

de vie $\beta = \frac{T_i - T_a}{T_g - T_a} = \frac{\Delta T}{T'}$. L'endommagement est déterminé par la variable D :

Avec :

T_a : température ambiante

T_i : température instantanée

T_g : température vitreuse

Le modèle du dommage statique consiste à déterminer l'évolution de la contrainte ultime résiduelle dont les variations sont dues essentiellement à l'endommagement.

On définit généralement les contraintes résiduelles [7] comme étant les efforts internes qui subsistent dans les pièces mécaniques lorsque ces dernières ne sont soumises à aucun effort extérieur.

Au cours de l'essai, nous avons suivi le phénomène d'endommagement entre l'état vierge et la rupture complète de l'éprouvette par la mesure des contraintes ultimes résiduelles, ce phénomène est quantifié par le paramètre dommage (D).

Avec :

σ_u : la contrainte ultime résiduelle

σ_{ur} : Valeur de la contrainte ultime pour différentes températures

σ_a : contrainte appliquée

$$D = \frac{1 - \frac{\sigma_{ur}}{\sigma_U}}{1 - \frac{\sigma_a}{\sigma_U}} \quad (1)[8]$$

➤ contrainte ultime résiduelle non dimensionnelle

Afin de normaliser la contrainte ultime résiduelle, nous examinons les rapports σ_{ur}/σ_u , les résultats sont présentés dans la figure. 4

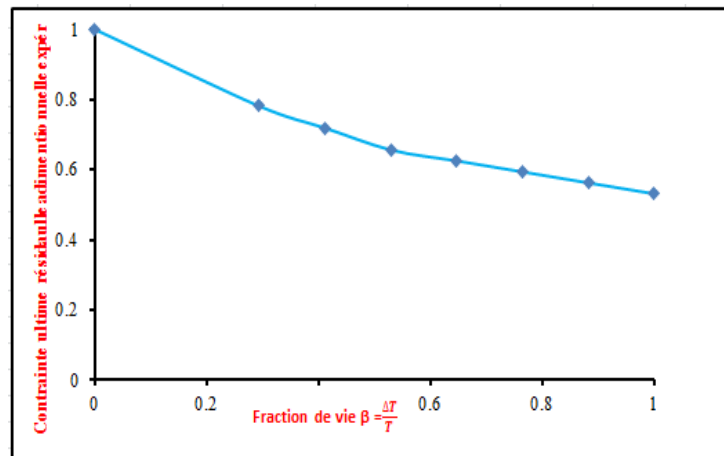


Figure 4. Variation du rapport adimensionnel de la contrainte ultime résiduelle en fonction de fraction de vie β

Les éprouvettes à température ambiante peuvent résister à une contrainte ultime $\sigma_u = 37 \text{ MPa}$. Autant que la réduction de l'épaisseur augmente, Les contraintes finales résiduelles diminuent de manière graduelle, Cela s'explique par une perte de la résistance des matériaux ABS en raison de l'augmentation de la température.

➤ Evolution du dommage statique

Le dommage en fonction de fraction de vie β est donné par la figure 5 avec les conditions suivantes :

$$\begin{array}{llll} \beta = 0 & \longrightarrow & \sigma_{ur} = \sigma_u & \longrightarrow & D = 0 \\ \beta = 1 & \longrightarrow & \sigma_{ur} = \sigma_a & \longrightarrow & D = 1 \end{array}$$

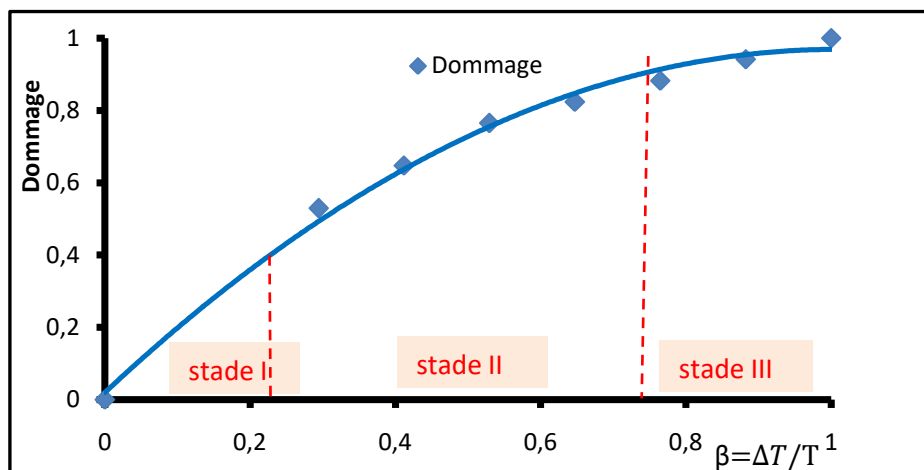


Figure 5 : Evolution du dommage en fonction de fraction de vie β

D'après la figure 5 nous remarquons que l'accroissement du dommage signifie l'augmentation de la perte en résistance en traction statique, cette perte évolue avec l'augmentation de la température.

Nous distinguons trois zones, la zone 1 qui correspond à l'initiation du dommage, la zone 2 qui correspond au dommage critique et la zone 3 qui correspond au dommage brutal.

➤ Relation Endommagement-Fiabilité

La fiabilité R est un paramètre statistique, qui suit l'évolution de la détérioration du matériau. Elle varie en sens inverse du dommage, donc la relation entre ces deux paramètres s'écrit comme suit : $R(\beta) + D(\beta) = 1$ [9]

La figure 6 illustre la variation de la fiabilité et de l'endommagement en fonction de la fraction de vie β dans la zone industrielle.

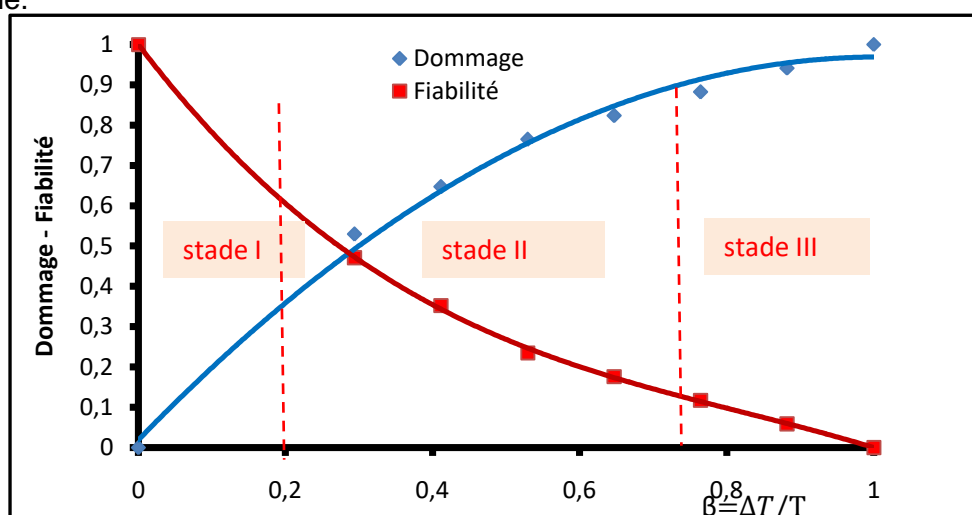


Figure 6. Evolution du dommage par rapport la fiabilité en fonction de fraction de vie β :

L'augmentation du dommage est nécessairement accompagnée par la diminution de la fiabilité (Figure 6). Au début, nous avons la zone d'initiation de l'endommagement (stade I), à 50% Les éprouvettes commencent à perdre leur résistance interne et le matériau en ABS commence à se dégrader, il s'agit de la propagation de l'endommagement, désignée par la zone d'endommagement progressif (stade II). A 80% du dommage la zone d'endommagement brutal qui correspond à une température critique de 70 °C. A ce stade III le matériau devient instable.

➤ Calcul du dommage par la théorie unifié dans la zone industrielle

Par corrélation à l'expression du dommage théorique proposé par la théorie unifiée [10], une relation décrivant l'évolution du dommage en fonction de la fraction de vie et des contraintes est donnée par l'équation (2):

$$D_{th} = \frac{\beta}{\beta + (1 - \beta) \left[\frac{\gamma - (\gamma/\gamma_u)^m}{\gamma - 1} \right]} \quad (2)$$

Avec

$\beta = \frac{\Delta T}{T}$	β = fraction de vie
$\gamma = \frac{\sigma_a}{\sigma_0}$	σ_0 = limite d'endurance
$\gamma_u = \frac{\sigma_u}{\sigma_0}$	σ_u = contrainte ultime du matériau vierge

σ_0 est la limite d'endurance résiduelle qui est égale à la contrainte ultime résiduelle multipliée par un coefficient α (pour $n=0$; $\sigma_0 = \alpha \sigma_u$) Pour un $\alpha = \frac{1}{\text{coefficient de sécurité}}$
 Le coefficient d'utilisation pour ABS est égal à 2.5, Ainsi le paramètre m est un paramètre matériel, avec $m=1$ pour les polymères amorphes selon [11]
 La variation du dommage en fonction de la fraction de vie β calculé d'après la relation (2) avec γ comme paramètre est illustrée à la figure 7. Chaque courbe est associée à un niveau de chargement.

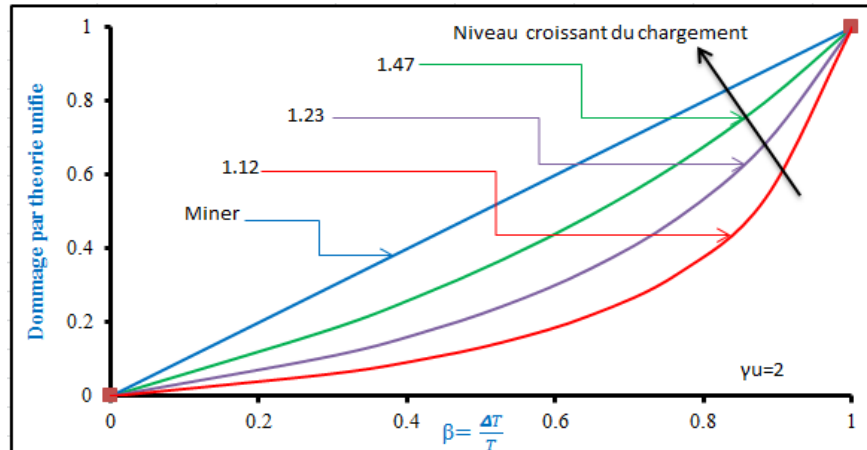


Figure 7. Courbes caractéristiques représentant le dommage en fonction de la fraction de vie, d'après la théorie unifiée dans la zone industrielle

Nous constatons que les allures relatives à différents niveau de chargement sont superposées selon l'ordre de γ (la courbe supérieure est celle avec le plus grand niveau de chargement). La dernière courbe relative au dernier chargement $\gamma=1.47$ présente un écart important par rapport aux autres chargements. La loi de Miner est plus critique relativement aux différents dommages relatifs a la théorie unifiée.

3.2.2 Détermination du dommage statique dans la zone de mise en forme ($T > T_g$)

Dans cette zone nous définissons une fraction de vie β' telle que : $\beta' = \frac{T_i - T_g}{T_c - T_g} = \frac{\Delta T}{T'}$

➤ contrainte ultime résiduelle non dimensionnelle

Afin de normaliser la contrainte ultime résiduelle, nous examinons les rapports σ_{ur} / σ_u , les résultats sont présentés dans la figure. 9

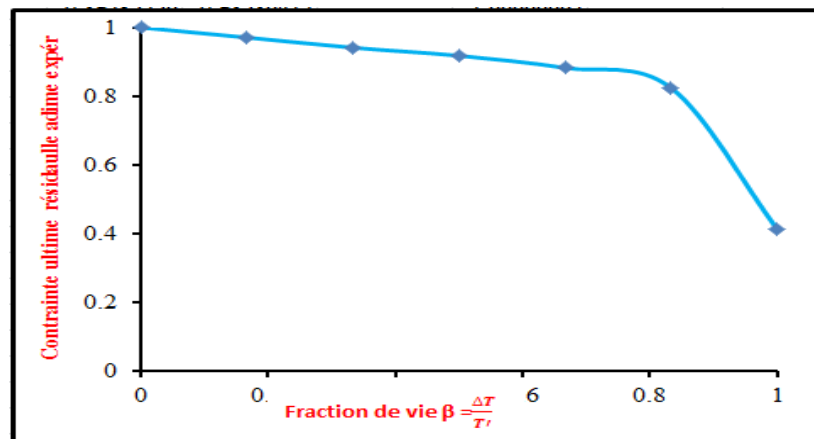


Figure 9. Variation du rapport adimensionnel de la contrainte ultime résiduelle en fonction de fraction de vie β'

Nous remarquons que le rapport σ_{ur} / σ_u décroît lorsque la température de l'éprouvette augmente, Cette normalisation nous a permis de relever la contrainte avant la rupture qui est égale à $\sigma_a = 0.43\text{MPa}$.

➤ Evolution du dommage statique dans la zone de mise en forme

La figure10. Illustre la variation de dommage en fonction de la fraction de vie β' dans la zone de mise en forme (thermoformage).

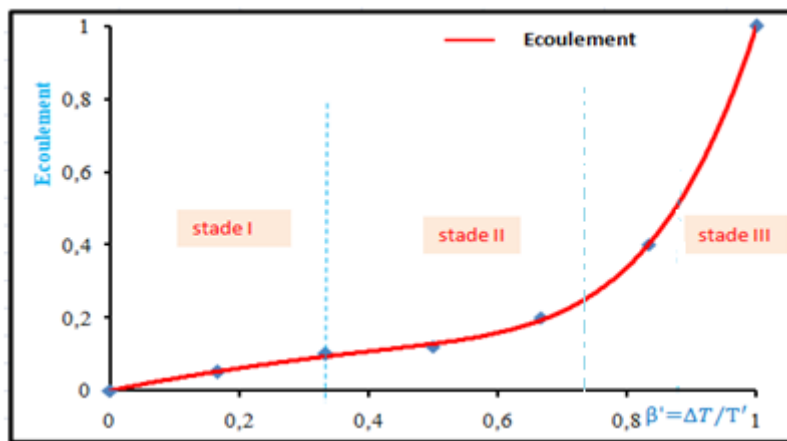


Figure 10. Evolution de l'écoulement en fonction de fraction de vie β' dans la zone de mise en forme.

La courbe 10 illustre la variation de l'écoulement en fonction de la fraction de la vie β' . Nous notons que l'écoulement augmente progressivement avec l'augmentation de la température, ceci s'explique par une perte de propriétés mécaniques provoquées par une augmentation de la température. En effet, l'évolution de l'écoulement est divisée en trois stades.

Dans la première étape ($0\% < \beta < 32\%$), l'écoulement commence à zéro et se développe lentement c'est à dire l'initiation de la malléabilité du matériau en ABS. La deuxième étape ($32\% < \beta < 70\%$) se caractérise par une augmentation de l'écoulement qui correspond à la phase caoutchouteuse (déformation des liaisons atomiques), de $\beta = 70\%$ commence la Troisième étape, dont l'écoulement s'accélère pour avoir une valeur de 1 qui correspond au domaine de travail en thermoformage.

➤ Relation écoulement –Fiabilité dans la zone de mise en forme

La figure 11 illustre la variation de la fiabilité et de l'écoulement en fonction de la fraction de vie β' dans la zone non industrielle.

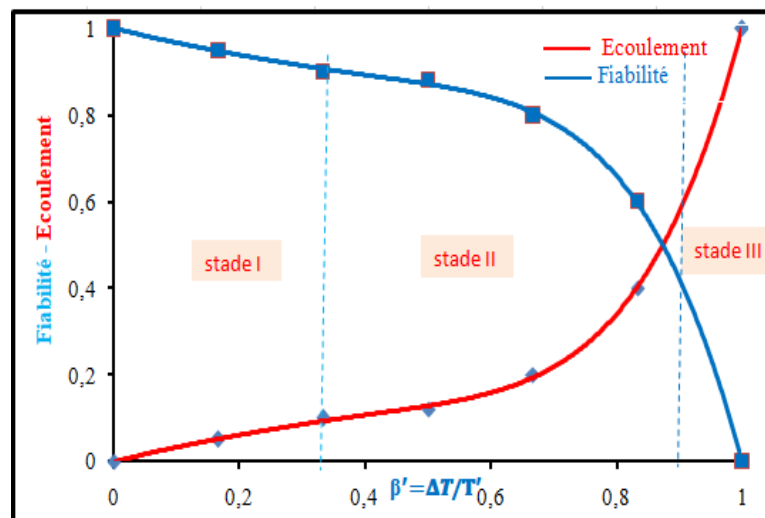


Figure 11 . Evolution de l'écoulement en fonction de la fraction de vie β' dans la zone de mise en forme

La courbe de la figure 11 représente au début une phase très longue et un comportement linéaire qui illustre un changement très faible et une température suffisamment large (stade I) initiation de la malléabilité de l'ABS, dans le stade II, on a une zone qui correspond une phase caoutchouteuse.

En fin on trouve le stade III, dans cette zone on ne peut pas contrôler le matériau.

➤ Calcul de l'écoulement par la théorie unifié dans la zone de mise en forme

La figure 12 représente les courbes de l'écoulement par la théorie unifiée dans la zone de mise en forme

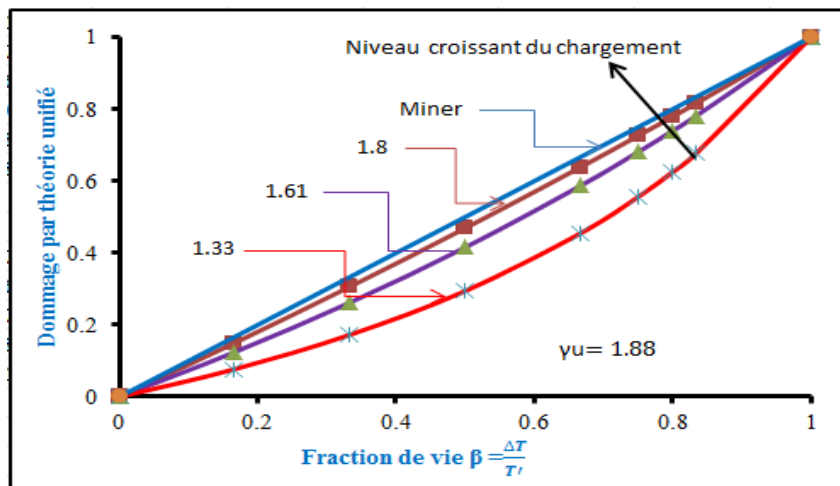


Figure 12. Courbes caractéristiques représentant l'écoulement caoutchouteux en fonction de la fraction de vie, d'après la théorie unifiée dans la zone de mise en forme

On remarque d'après les différentes courbes, qui représente le dommage selon la théorie unifiée dans la zone de mise en forme que l'augmentation de chargement a pour effet d'approcher les courbes de l'écoulement à la courbe de miner et on constate aussi que les courbes correspondants aux dommages après la température vitreuse sont presque superposés et confondus avec un écart très petit.

4. Conclusion

Le but de ce travail, d'une part est de mieux comprendre le comportement mécanique des polymères utilisés dans l'industrie, surtout l'ABS et connaître les paramètres agissant sur le comportement de ce matériau pour fournir des solutions aux problèmes rencontrés lors de l'utilisation.

Nous avons aussi constaté d'une part que dans la partie industrielle dans laquelle la température est en dessous de la température vitreuse le dommage croît au fur et à mesure que le matériau ABS étudié perd sa résistance et quand la température devienne plus importante. D'autre part on remarque que le dommage statique est plus dangereux que le dommage calculer par la théorie unifiée.

Dans la deuxième partie (partie de mise en forme), nous avons pu relier la fiabilité à l'endommagement à travers la fraction de vie dans un intervalle de température de la température vitreuse jusqu'à la température de fusion. Le dommage croît au fur et à mesure que le matériau étudié "L'Acrylonitrile Butadiène Styrène" perd sa résistance, et quand la température devienne plus importante.

La fiabilité varie au sens inverse du dommage et définit les trois stades de la propagation de la fissure.

5. Références

- [1] Rajaa RHANIM« Study of the mechanical behavior of damaged structures Of polymers. Digital Calculation / Testing Dialogue. Application to photoelasticimetry2016
- [2] comportement mecanique des polymeres
- [3] B. Ni, J. Li et V. Berry, «Plastic zone in front of a mode I crack in acrylonitrile-butadiene-styrene
- [4]Fiche technique de L'ABS
- [5] I. Makadir , M. Barakat , M. Elghorba, H. Farid «Study of Damage to ABS Specimens Submitted To Uniaxial Loading», The International Journal Of Engineering And Science(IJES), Volume 4, Issue 1,January – 2015,Pages , 05-08.
- [6] ASTM D638-03 Standard test method for tensile properties of plastics.
- [7] C. Bathias, J. Bailon, La fatigue des matériaux et des structures, pp. 328-330. 1980
- [8] N.Mouhib et al "Tensile test of a strand with 2 broken wires artificially damaged "2015"
- [9] P. Chapouille et P.DePazzis, "Fiabilité des systèmes", Editions Masson (1968).
- [10] M. Chahid, G. M. El, M. Benhamou et Z. Azari, «Optimisation fiabiliste de l'endommagement en fatigue d'un matériau composite fibres de verre-époxyde,» Matériaux et techniques, vol. 84, pp. 13-17, 1996.
- [11] Fatima Majid, Mohamed Elghorba, Continuum damage modeling through theoretical and experimental pressure limit formulas , Frattura ed Integrità Strutturale, 43 (2018) 79-89; DOI: 10.3221/IGF-ESIS.43.05