



HAL
open science

**INFLUENCE DE LA VITESSE DE DEFORMATION
ET DE LA TEMPERATURE SUR LE
COMPORTEMENT DU POLYSTYRENE :
APPROCHE DE LA SIMULATION DU PROCESSUS
DE THERMOFORMAGE**

Ph. Steer

► **To cite this version:**

Ph. Steer. INFLUENCE DE LA VITESSE DE DEFORMATION ET DE LA TEMPERATURE SUR LE COMPORTEMENT DU POLYSTYRENE : APPROCHE DE LA SIMULATION DU PROCESSUS DE THERMOFORMAGE. Journal de Physique Colloques, 1988, 49 (C3), pp.C3-727-C3-731. 10.1051/jphyscol:19883103 . jpa-00227731

HAL Id: jpa-00227731

<https://hal.science/jpa-00227731>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INFLUENCE DE LA VITESSE DE DEFORMATION ET DE LA TEMPERATURE SUR LE COMPORTEMENT DU POLYSTYRENE : APPROCHE DE LA SIMULATION DU PROCESSUS DE THERMOFORMAGE

Ph. STEER

NORSOLOR, Groupe CdF CHIMIE, Centre de Recherches Nord, BP 57, F-62670 Mazingarbe, France

RESUME :

Le test de traction monoaxiale à grande vitesse de déformation et hautes températures constitue une bonne approche de la simulation du thermoformage des résines de polystyrène. La confrontation des résultats obtenus d'une part sur gobelets quadrillés et d'autre part sur des éprouvettes de traction aboutit aux mêmes conclusions concernant l'analyse de la déformation de la feuille de polystyrène lors de la mise en oeuvre. Les mesures d'allongement à la rupture sur éprouvettes à différentes vitesses de traction et différentes températures d'essai permettent de prédire sans ambiguïté la température minimale de thermoformage d'une résine donnée.

Abstract :

Thermoforming of polystyrene resins is analysed by means of high strain-rate testing apparatus. Results on squared thermoformed sheets and drawn samples give the same conclusions about deformation process of polystyrene during thermoforming. Breaking strain measurements of samples tested at same strain-rate and temperature involved in thermoforming process allow to "predict" the minimum thermoforming temperature for a given resin.

INTRODUCTION

Le processus de thermoformage des matières plastiques consiste à mettre en oeuvre un objet fini par pénétration d'un poinçon métallique dans une feuille de matériau polymère préalablement chauffée. Ce processus de transformation est utilisé pour la réalisation de pièces creuses de grandes dimensions telles que les cuves de réfrigérateurs, les emballages de laiterie ou les tableaux de bord des véhicules automobiles.

Pour analyser le comportement de résines de polystyrènes dans les conditions analogues à ce processus de transformation industrielle, nous avons développé un appareillage de traction monoaxiale permettant d'atteindre des vitesses de déplacement analogues aux vitesses de pénétration du poinçon dans la feuille de matière et des températures d'essai de 150°C. Les éprouvettes sont dimensionnées pour atteindre des vitesses de déformation jusqu'à 100 s⁻¹ qui sont celles que subit la feuille lors de l'étirage à chaud pendant le processus de thermoformage.

L'écoulement de la feuille en matière plastique lors de la mise en oeuvre inclut des combinaisons d'extensions uni-axiales, biaxiales et de cisaillement qui se produisent avec des importances diverses dépendant en particulier de la géométrie de la pièce en formation.

A cause de la complexité des conditions de déformation, certains chercheurs ont simplifié la modélisation du thermoformage [1-2]. Ils ont essayé d'évaluer l'aptitude potentielle au thermoformage à partir des seuls paramètres uniaxiaux et biaxiaux de déformation sous vitesse et(ou) sous charge constante. Notre approche est similaire et nous présentons une description du montage expérimental réalisé et de ses performances en confrontant les résultats des tests d'élongation sur éprouvettes haltères aux résultats obtenus sur gobelets in situ lors du thermoformage.

Nos conclusions porteront sur l'apport du test de simulation quant à la prédiction de l'aptitude au thermoformage d'une résine.

I - SIMULATION MONOAXIALE DU THERMOFORMAGE

I.1/ Appareillage de traction

L'appareillage de traction a été réalisé dans nos laboratoires. Il est constitué d'un bâti de traction (figure 1) dont l'un des bras est mobile et solidaire d'un groupe d'entraînement hydraulique qui permet d'assurer une vitesse de déplacement constante en régulant la pression d'huile à l'aide d'un vernier. L'autre bras est fixe ; il est relié à une cellule dynamométrique afin de mesurer les efforts développés sur l'éprouvette lors de la sollicitation.

L'ensemble est solidaire d'un four isotherme dont la régulation permet d'assurer la température de consigne à $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Les vitesses de déplacement accessibles par l'appareillage sont comprises entre 0,005 m/s et 0,9 m/s. L'ensemble permet donc d'assurer des vitesses de déplacement analogues à celles du piston de la thermoformeuse. Les températures de travail sont comprises entre 100°C et 130°C , températures de thermoformage du polystyrène. La résine utilisée est le Gedex 5340 GA 200, qualité super choc de polystyrène de la gamme Gedex de NORSOLOR.

I.2/ Epreuves de traction

Les éprouvettes sont de géométrie haltère de longueur utile $L_0 = 12$ mm, d'épaisseur $e = 1$ mm et de largeur 6 mm. Ces éprouvettes sont fraisées à partir de rectangles découpés perpendiculairement à la direction d'extrusion.

Compte tenu des vitesses de déplacement autorisées par notre appareillage, les vitesses de déformation accessibles sont comprises entre 1 s^{-1} et 80 s^{-1} . Il est à noter que cette gamme de vitesse n'est pas accessible sur les appareils de traction "classiques" de laboratoire pour lesquels la vitesse de déplacement n'excède jamais 500 mm/mn, c'est à dire en général une vitesse de déformation inférieur à 1 s^{-1} . Notre dynamomètre est donc complémentaire de la dynamométrie de laboratoire et permet de travailler dans le domaine des vitesses de déformation que LINDHOLM [3] a classé comme "vitesses intermédiaires".

II - APPROCHE EXPERIMENTALE DU THERMOFORMAGE

II.1/ Mesures sur gobelets

Afin de confronter les résultats des tests de simulation monoaxiale aux déformations réelles des plaques lors du thermoformage, nous avons réalisé une série de feuilles quadrillées (5 mm x 5 mm) qui ont ensuite été thermoformées (figure 2).

Les conditions de thermoformage sont les suivantes :

- Cadence : 24 cps/min
- Temps de descente du piston : 0,03 s
- Déplacement vertical du piston : 70 mm
- Vitesse de descente du piston : 2 m/s
- Profondeur gobelet : 85 mm
- Pression de formage : 7 kg/cm²
- Température de la feuille : 110-115°C

La mesure des taux d'allongement linéaire a été effectuée le long de 40 génératrices sur 12 gobelets. Nous avons ainsi pu mettre en évidence la distribution et la dispersion des taux d'allongement le long du corps du gobelet qui dépendent à la fois de la distribution d'épaisseur le long du gobelet et de la température de thermoformage.

En effet, on constate qu'à 137°C la distribution des déformations est très hétérogène et correspond à un gobelet mal thermoformé dont la colliette est très fine et le fond très

épais. A 110°C, qui est la température optimale de thermoformage pour cette résine et cette forme d'objet, la distribution des déformations est plus resserrée et le taux de déformation global moyen est de l'ordre de 200 %. Le taux d'étirage maximal est de 440 %.

D'autre part, on constate sur la figure 2 que le thermoformage met en jeu des conditions complexes de déformation et que la modélisation par étirage monoaxial représente une approche très simplificatrice du phénomène.

II.2/ Traction monoaxiale grande vitesse

La figure 3 représente l'allure des courbes obtenues à la vitesse de déplacement de 0,8 m/s pour des températures d'essai de 100°C et 130°C. Cette vitesse de déplacement correspond à la vitesse moyenne du déplacement du poinçon de la thermoformeuse.

Les courbes obtenues sont caractéristiques de la déformation des polymères amorphes à l'état vitreux et à l'état caoutchoutique. La zone de température d'essai correspond en effet à celle de la transition vitreuse du polystyrène choc Gedex 5340 GA 200.

En-deçà de 115°C, le comportement de la résine est caractérisé par des contraintes à la limite élastique élevée et un allongement peu important.

Au-delà de 115°C, l'allure des courbes est semblable aux courbes de déformation des matériaux élastomériques, à savoir des faibles contraintes développées pour des allongements de l'ordre de plusieurs centaines de pourcent.

La partie utile des éprouvettes est caractérisée aux températures inférieures à 110°C par un fort blanchiment caractéristique d'une déformation hétérogène sans que celle-ci puisse être identifiée de manière formelle à du crazing ou du cisaillement. Lorsque la température d'essai s'accroît, le blanchiment disparaît et correspond à l'établissement d'un régime de déformation homogène.

La modification du régime de déformation du polystyrène choc est liée au passage de l'état vitreux à l'état caoutchoutique de la résine qui, à la vitesse de 0,8 m/s, s'effectue aux alentours de 115°C.

En conséquence, la zone de thermoformage de la résine correspond à la zone de transition vitreuse de celle-ci, compte tenu de l'effet de la fréquence de sollicitation liée au formage.

Les transitions vitreuses du polystyrène choc Gedex 5340 GA 200 ont été mesurées aux fréquences de 0,1 Hz et de 80 Hz. Celles-ci ont respectivement pour valeurs 92°C et 106°C. Il est à noter que le décalage observé (5K par décade de fréquence) correspond aux résultats de la littérature. Ceci permet d'évaluer la fréquence de sollicitation équivalente au thermoformage qui serait donc de l'ordre de 1 kHz à 10 kHz.

II.3/ Critère de thermoformage

Les travaux de MALPASS et WHITE [3] sur le thermoformage des ABS ont montré que l'évolution de la contrainte à la limite élastique σ_y et de la déformation à la rupture avec la température permettent de définir un intervalle de température de formage. En effet, plus le plateau d'écoulement plastique (en traction) sera important, et plus l'intervalle de température de formage sera large. Les fluctuations de température à travers la plaque seront également réduites. La déformation potentielle maximale correspond à un minimum de la charge appliquée dans les tests de tension à chaud ($T > T_g$). A cette elongation, le matériau a véritablement perdu toute son énergie élastique et la déformation devient essentiellement visqueuse. Des déformations plus importantes entraîneront amincissements et ruptures du matériau.

Les conclusions de MALPASS et WHITE permettent d'envisager la prévision de la plage de température de thermoformage d'une résine donnée à partir d'un critère de contrainte et d'un critère de déformation.

II.3.1/ Détermination de la température minimale de thermoformage

Le Gedex 5340 GA 200 supposé bien thermoformé (épaisseur, transparence, écrasement) est travaillé à une température de $110 \pm 1^\circ\text{C}$ et à la vitesse d'emboutissage de 0,8 m/s. Le taux d'étirage linéaire maximal relevé localement sur les gobelets à cette température et cette vitesse est de 440 % (figure 6). Il est localisé au niveau de la collerette du gobelet.

A la vitesse de 0,8 m/s, la température à laquelle l'allongement rupture correspond à l'allongement maximum sur gobelets est de 112°C . Cette température coïncide avec la température minimale de mise en oeuvre du Gedex 5340, qui permet de thermoformer un gobelet de bonne qualité. Cette constatation permet donc d'envisager la détermination de la température de thermoformage minimale d'une résine quelconque à partir d'un essai de traction. Il faut cependant noter qu'un tel critère suppose implicitement que la déformation de la feuille lors du thermoformage sont homogène. La valeur d'allongement retenue est l'allongement maximal relevé sur gobelet et non pas la valeur de déformation moyenne. Ceci restreint le critère.

Pour que celui-ci soit bi-univoque, il faut se fixer un second critère, géométrique par exemple, pour l'épaisseur du gobelet au niveau de la collerette.

A cette condition, l'évolution de l'allongement à la rupture en fonction de la température à une vitesse d'élongation analogue à la vitesse du poinçon permet de prédire la température minimale de thermoformage d'une résine quelconque.

IV - CONCLUSION

Le test de traction (monoaxial) à grande vitesse de déformation et hautes températures constitue une bonne approche de la simulation du thermoformage des résines de polystyrène.

Les mesures d'allongement à la rupture sur éprouvettes à différentes vitesses de traction et différentes températures d'essai permettent de prédire sans ambiguïté la température minimale de thermoformage d'une résine donnée. Ce test se révèle, par ailleurs, rapide et peu coûteux en matière première.

D'un point de vue fondamental, nous avons constaté que la déformation au-delà du seuil d'écoulement limite la mise en oeuvre du produit. Compte tenu du fait que ces mécanismes de déformation sont gouvernés par les transitions de relaxation du polymère (vitreuse ou secondaire), nous étudions actuellement le rôle de celles-ci dans l'aptitude au thermoformage du produit.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] TSAI J.T., SPE JOURNAL 1981
- [2] MALPASS V.E., WHITE C.H. SPE JOURNAL 1971
- [3] LINDHOLM Techniques in Metals Research Vol 5, Editions R.F. BUNSHAH (N.Y.) Inter-Science

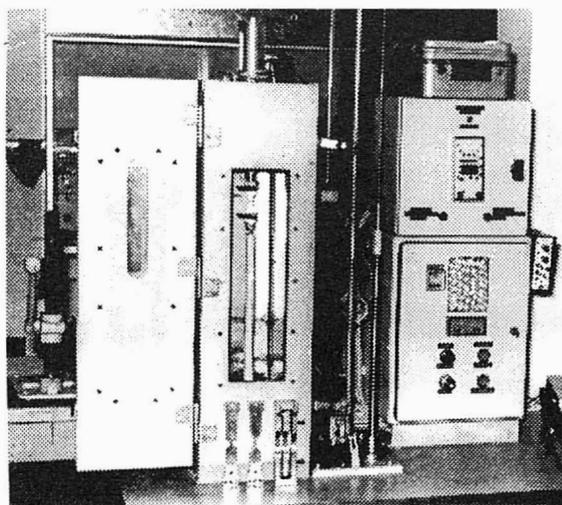


Figure 1 : Appareillage de traction monoaxiale

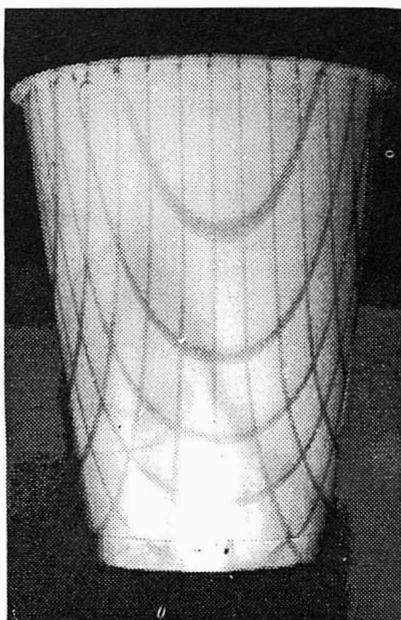


Figure 2 : Gobelet quadrillé thermofomé

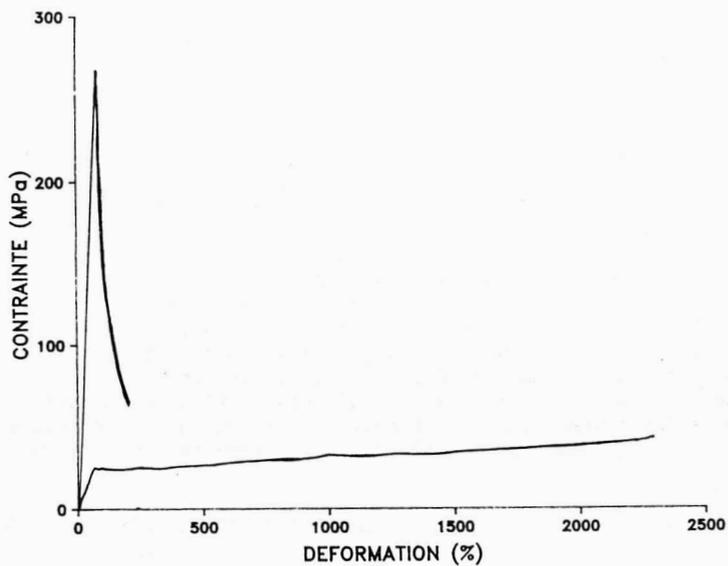


Figure 3 : Evolution de la contrainte en fonction de la déformation à 100°C et 130°C à la vitesse de 80 s⁻¹