

Etude expérimentale et numérique de l'influence de la température et de la vitesse de déformation sur le thermoformage assisté par poinçon du polystyrène

O. ATMANI^a, B. ABBÈS^b, F. ABBÈS^c, Y.M. LI^d, S. BATKAM^e

a. GRESPI, Université de Reims Champagne-Ardenne/Pack3.0, France,
oualid.atmani@etudiant.univ-reims.fr

b. GRESPI, Université de Reims Champagne-Ardenne, France, boussad.abbes@univ-reims.fr

c. GRESPI, Université de Reims Champagne-Ardenne, France, fazilay.abbes@univ-reims.fr

d. GRESPI, Université de Reims Champagne-Ardenne, France, yuming.li@univ-reims.fr

e. Pack3.0, Neung sur Beuvron, France, serge.batkam@pack3-0.com

Résumé :

L'objectif de ce travail est l'étude expérimentale et numérique de l'influence de la température et de la vitesse de déformation du polystyrène compact (HIPS) dans les conditions du thermoformage assisté par poinçon. Pour décrire le comportement rhéologique du HIPS au cours du processus de thermoformage, nous avons proposé un modèle thermo-élasto-viscoplastique, que nous avons implémenté dans le logiciel ABAQUS/Explicit à l'aide d'un sous-programme VUMAT. Les paramètres du modèle proposé ont été identifiés par une méthode inverse et validés à l'aide d'essais expérimentaux de poinçonnage en comparant la réponse force-déplacement et la distribution des épaisseurs sur la feuille poinçonnée.

Abstract:

The objective of this work is the experimental and numerical study of the influence of the temperature and the strain rate of high impact polystyrene (HIPS) under the conditions of plug-assisted thermoforming. To describe the rheological behavior of HIPS during the thermoforming process, we proposed a thermo-elasto-viscoplastic model, which we implemented in the ABAQUS/Explicit software using a VUMAT subroutine. The parameters of the proposed models have been identified by an inverse method, and validated using experimental punching tests by comparing the force-displacement response and the thickness distribution on the punched sheet.

Mots clefs : Thermoformage assisté par poinçon, comportement thermo-élasto-viscoplastique, méthode des éléments finis, polystyrène compact.

1 Introduction

Le thermoformage assisté par poinçon est un procédé très utilisé pour la fabrication des emballages comme les gobelets, les pots de yaourt ...etc. Le procédé de thermoformage assisté par poinçon s'effectue en trois principales phases : chauffage d'une feuille thermoplastique, poinçonnage et

soufflage. Afin de faciliter sa déformation, la feuille polymère est chauffée au-dessus de la température de transition vitreuse tout en restant en-dessous de la température de fusion pour les polymères semi-cristallins. Elle est ensuite étirée en utilisant un poinçon. Enfin, une pression d'air est appliquée sur celle-ci pour la plaquer sur les parois du moule. Le poinçon permet l'apport d'une quantité de matière suffisante au fond de la pièce fabriquée et améliore donc sa résistance mécanique.

La multitude des paramètres opératoires et la complexité de ce procédé nécessitent de nombreux essais/corrections pour obtenir des emballages respectant un cahier des charges précis [1]. Pour réduire les délais et les coûts inhérents à la conception des moules et à l'optimisation du procédé, la simulation numérique joue un rôle important [2, 3]. Plusieurs travaux ont montré que pour le thermoformage assisté par poinçon, trois phénomènes importants conditionnent la qualité du produit fini : la rhéologie du matériau, le contact feuille/poinçon et les transferts thermiques [4, 5, 6, 7]. Ces trois phénomènes sont interdépendants, et dont il est très difficile d'en séparer les effets, augmentant ainsi la complexité de la modélisation.

Pour modéliser le comportement rhéologique des polymères dans le procédé de thermoformage assisté par poinçon, trois types de modèles sont généralement utilisés : les modèles hyper-élastiques [8], viscoélastiques [2] et viscoplastiques [9]. Le comportement des thermoplastiques dépend fortement de la température et de la vitesse de déformation, alors que les modèles existants dans la littérature ne sont généralement valables que dans une gamme limitée de température et de vitesse de déformation. Il est donc important de développer un modèle rhéologique permettant de décrire à la fois : les petites déformations, les grandes déformations, les effets de la température et les effets de la vitesse de déformation. D'autre part, le contact entre la feuille et le poinçon est très important, car il règle l'apport de matière au fond du produit fabriqué. Cet apport est conditionné par les échanges thermiques avec le poinçon et le frottement, ainsi que par le comportement mécanique de la feuille, les effets de ces trois paramètres étant étroitement interdépendants. Le découplage des effets de la thermique et du frottement s'avère donc nécessaire pour une modélisation correcte.

Pour décrire le comportement rhéologique du HIPS au cours du processus de thermoformage, nous avons proposé un modèle thermo-élasto-viscoplastique, que nous avons implémenté dans le logiciel aux éléments finis ABAQUS/Explicit à l'aide d'un sous-programme VUMAT. Nous avons ensuite développé une méthode inverse pour identifier le comportement thermomécanique du polystyrène choc dans les conditions de thermoformage assisté par poinçon. En plus des essais thermomécaniques classiques (traction uni-axiale, DSC, DMTA), des essais de poinçonnement à différentes températures et différentes vitesses du poinçon ont été utilisés.

2 Etude expérimentale

2.1 Effets de la température et de la vitesse de déformation

Afin d'étudier les effets de la température et de la vitesse de poinçonnement sur le comportement thermomécanique du HIPS, plusieurs types d'essais expérimentaux ont été réalisés : traction uni-axiale, DSC, DMTA et essais de poinçonnage. Dans cette première approche, nous nous sommes intéressés au comportement thermomécanique du HIPS. Afin de minimiser les effets de frottement et d'échange thermique entre le polymère et le poinçon, nous avons effectué des essais de poinçonnage à l'aide d'un poinçon lubrifié ayant la même température que la feuille. Les essais ont été réalisés au-dessus de la température de transition vitreuse qui a été estimée à 105°C à l'aide des essais de DSC et de DMTA.

La figure 1 montre les résultats des essais de traction uni-axiale à différentes températures et différentes vitesses de sollicitations. La rigidité du polystyrène choc diminue de manière significative avec l'augmentation de la température d'essai (Fig. 1(a)) et avec la diminution de la vitesse de sollicitation (Fig. 1(b)).

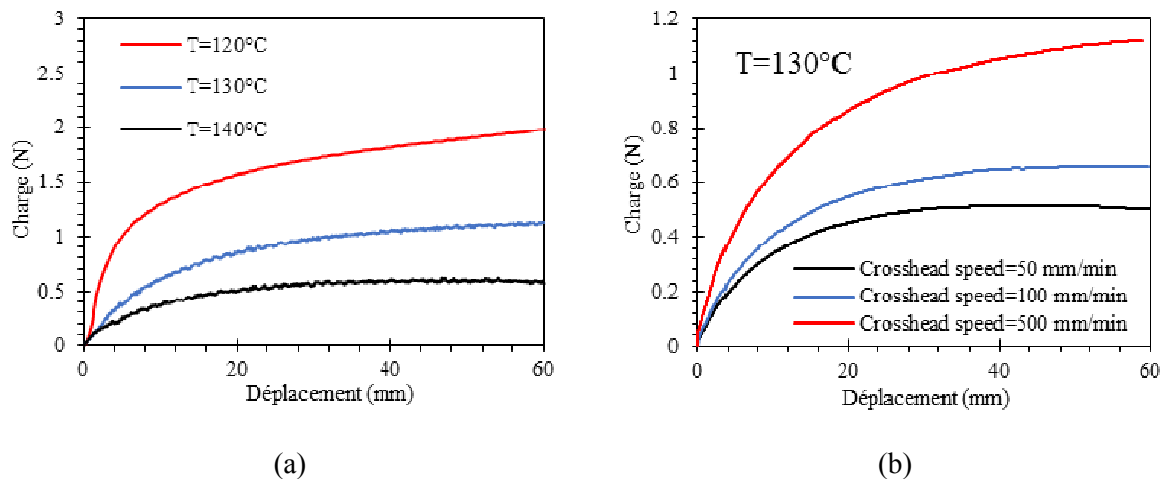


Figure 1 : Effets de la température (a) et de la vitesse d'essais (b) sur le comportement du polystyrène choc.

Pour les essais de poinçonnement, la feuille rectangulaire $200 \times 200 \text{ mm}^2$ est encadrée à ses extrémités. Dans le poste de chauffage, la feuille est chauffée jusqu'à la température souhaitée puis immédiatement transférée vers le poste de formage. Le poinçon descend à une vitesse contrôlée ($V = 0.2$ à 1 m/s) et s'arrête après une course de 60 mm. En fin d'essai, le poinçon revient à sa position initiale. La figure 2 montre l'influence de la vitesse de poinçonnement sur le comportement du HIPS à une même température. Quand la vitesse de poinçonnement augmente, la force exercée par le poinçon est plus importante et la rigidité apparente de la feuille de polystyrène choc augmente.

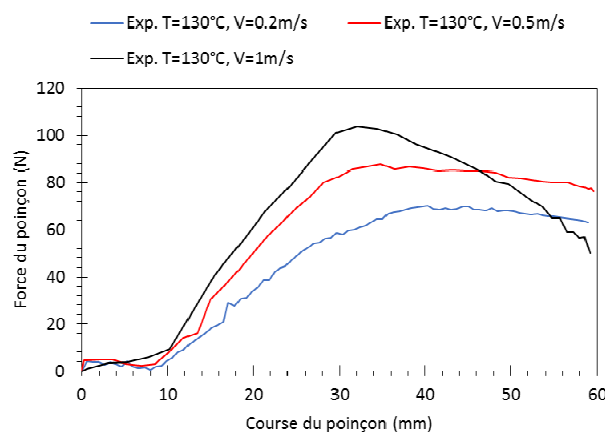


Figure 2: Effet de la vitesse de poinçonnement sur le comportement du polystyrène choc à $T = 130^\circ\text{C}$.

3 Modélisation du comportement thermomécanique du HIPS

3.1 Modèle rhéologique

Pour décrire le comportement thermomécanique du polystyrène choc dans les conditions de thermoformage, nous proposons une loi thermo-élasto-viscoplastique adapté à partir de la loi proposée par G'Sell et al. [10, 11] :

$$\begin{cases} \sigma \leq \sigma_0(T) : \sigma = E(T) \cdot \varepsilon \cdot \dot{\varepsilon}^m \\ \sigma > \sigma_0(T) : \sigma = \sigma_0(T) + K(T) \cdot (1 - \exp(-w\bar{\varepsilon}_p)) \cdot \exp(h(T)\bar{\varepsilon}_p^n) \cdot \dot{\varepsilon}^m \end{cases} \quad (1)$$

où ε est la déformation totale, $\bar{\varepsilon}_p$ est la déformation plastique équivalente et $\dot{\varepsilon}$ est la vitesse de déformation. w , m et n sont les paramètres constants du modèle à identifier. Les paramètres dépendants de la température sont : le module élastique $E(T)$, la limite élastique $\sigma_0(T)$, la consistance du matériau $K(T)$ et le coefficient de durcissement structural $h(T)$.

Ces paramètres thermodépendants $A(T)$ sont définis sous la forme d'une loi d'Arrhenius tels que :

$$A(T) = A_g \exp\left(a\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_g}\right)\right) \quad (2)$$

où A_g et a sont les paramètres du modèle à identifier.

Ce modèle a été choisi car il permet de décrire le comportement du polystyrène-choc qui est un polymère amorphe caractérisé par une température de transition vitreuse T_g . Il présente un comportement rigide pour les températures inférieures à T_g et aux grandes vitesses de déformation et un comportement caoutchoutique pour les températures supérieures à T_g .

Le modèle défini par les équations (1) et (2) a été programmé dans le code de calcul par éléments finis ABAQU/Explicit à l'aide du sous-programme utilisateur VUMAT. Les paramètres du modèle ont été ensuite identifiés par analyse inverse [12].

3.2 Simulation numérique

Nous avons réalisé des simulations numériques de l'essai de poinçonnement à la température de 130°C et à trois vitesses de poinçonnement : 0.2 m/s, 0.5 m/s et 1 m/s. La géométrie du modèle correspondant au montage expérimental est représentée sur la figure 3. Pour les simulations, le moule, le contre moule et le poinçon sont considérés comme des corps rigides. La feuille en HIPS de dimensions (200mm×200mm×1.1mm) est modélisée comme une coque déformable en utilisant les éléments S4RT d'ABAQUS. Comme le poinçon est lubrifié, une condition de contact sans frottement a été utilisé pour les simulations numériques.

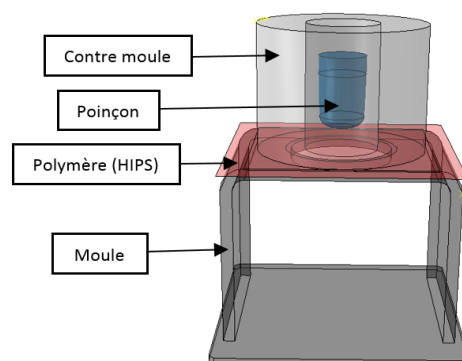


Figure 3: Modèle Abaqus de l'essai de poinçonnement.

La Figure 4 montre la comparaison des courbes numériques et expérimentales de poinçonnement avec

lubrification à la température de 130°C et à trois vitesses de poinçonnement : 0.2 m/s, 0.5 m/s et 1 m/s. La force de poinçonnement augmente avec la vitesse de poinçonnement car les effets élastiques sont dominants à grande vitesse de déformation. Ces courbes montrent une bonne corrélation entre les résultats numériques et expérimentaux.

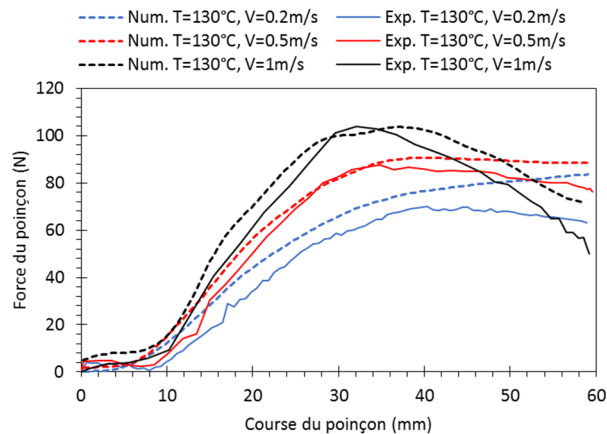


Figure 4: Comparaison des courbes numériques et expérimentales de poinçonnement avec lubrification.

La Figure 5 montre la comparaison des profils d'épaisseurs pour le poinçonnement avec lubrification à $T = 130^{\circ}\text{C}$ et $V = 1 \text{ m/s}$. Le profil des épaisseurs est bien estimé par la simulation numérique. On voit bien qu'en l'absence de frottement l'apport de la matière dans le fond du pot est faible, puisque c'est le contact feuille/poinçon qui permet d'amener suffisamment de matière dans le fond.

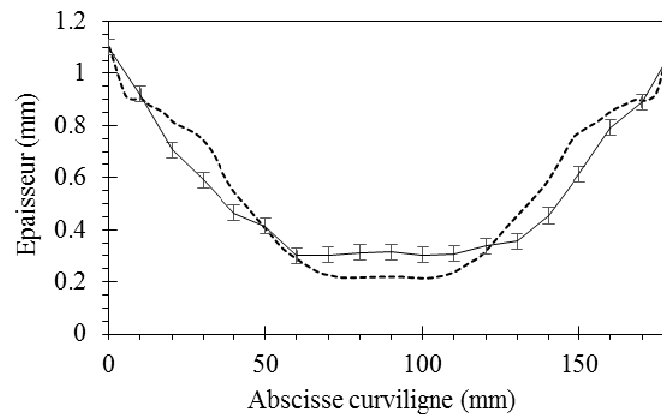


Figure 5: Comparaison des profils d'épaisseurs pour le poinçonnement avec lubrification à $T = 130^{\circ}\text{C}$ et $V = 1 \text{ m/s}$.

4 Conclusion

Nous avons proposé dans ce travail un modèle thermo-élasto-viscoplastique pour modéliser le comportement rhéologique du polystyrène choc dans les conditions de thermoformage assisté par poinçon. Le modèle a été implémenté dans le logiciel ABAQUS/Explicit en utilisant le sous-programme utilisateur VUMAT. Les essais expérimentaux de traction uni-axiale ont permis de montrer que la rigidité du polystyrène choc diminue de manière significative avec l'augmentation de la température d'essai et avec la diminution de la vitesse de sollicitation. Pour éviter l'influence des effets du frottement

et des transferts thermiques entre la feuille et le poinçon, des essais de poinçonnement ont été réalisés avec un poinçon lubrifié et chauffé à la même température que la feuille. Les résultats obtenus avec le modèle proposé ont été comparés avec succès aux résultats expérimentaux de poinçonnement en termes de force de poinçonnement et de distribution d'épaisseur de feuille en fin de poinçonnage. La prochaine étape de modélisation consiste à prendre en compte le frottement et les transferts thermiques entre la feuille et le poinçon, en faisant varier d'une part le type de poinçon utilisé (aluminium, feutre), et d'autre part la température du poinçon.

Références

- [1] C.A. Bernard, J.P.M. Correia, Nadia Bahlouli, Said Ahzi. Numerical simulation of plug-assisted thermoforming process: application to polystyrene, *Key Engineering Materials Vols. 554-557, 1602-1610, 2013*.
- [2] P. Collins, J.F. Lappin, E.M.A. Harkin-Jones, P.J. Martin. Effects of material properties and contact Conditions in modelling of plug assisted thermoforming, *Plastics Rubber and Composites*, 349–359, 2000.
- [3] H. Hosseini, B. V. Berdyshev, A. Mehrabani-Zeinabad. A solution for warpage in polymeric products by plug-assisted thermoforming, *European Polymer Journal*, 1836–1843, 2006.
- [4] R. A. Morales, M. V. Candal, O.O. Santana, A. Gordillo, R. Salazar. Effect of the thermoforming process variables on the sheet friction coefficient, *Materials and Design*, 1097–1103, 2014.
- [5] C.P.J. O'Connor, P.J.Martin, J.Sweeney, G.Menary, P.Caton-Rose, P.E.Spencer. Simulation of the plug-assisted thermoforming of polypropylene using a large strain thermally coupled constitutive model, *Journal of Materials Processing Technology*, 1588– 1600, 2013.
- [6] Kittikanjanaruk, S. Patcharaphun. Computer simulation and experimental investigations of wall-thickness distribution in high impact polystyrene and amorphous polyethylene terephthalate thermoformed parts, *Kasetsart Journal- natural science*, 47: 302–309, 2013.
- [7] H. Hosseini, B.B. Vasilivich, A. Mehrabani-Zeinabad. Rheological modeling of plug-assist thermoforming, *Journal of Applied Polymer Science*, 4148–4152, 2006.
- [8] Y. Dong, R.J.T. Lin, D. Bhattacharyya. Finite element simulation on thermoforming acrylic sheets using dynamic explicit method, *Polymers & Polymer Composites*, 307–328, 2006.
- [9] A. Makradi, S. Ahzi, S. Belouettar, D. Ruch. Thermoforming process of semicrystalline polymeric sheets: Modeling and finite element simulations, *Polymer Science Series A*, 550-557, 2008.
- [10] C. Gsell, A. Dahoun, P. Duffo, B. Monasse, J. M. Haudin. Polypropylene in the solid state, *journal of materials science* 30, 701- 711, 1995.
- [11] C. G'Sell. Instabilités de déformation pendant l'étirage des polymères solides, *Revue de Physique Appliquée*, 1085–1101, 1988.
- [12] O. Atmani, B. Abbès, F. Abbès, Y. M. Li, and S. Batkam. Identification of a thermo-elasto-viscoplastic behavior law for the simulation of thermoforming of high impact polystyrene, *AIP Conference Proceedings*, 120003-1–120003-6, 2018.