

Etude expérimentale et numérique du comportement du polystyrène choc soumis à des essais de poinçonnement

O. Atmani¹, B. Abbès², F. Abbès², Y. M. Li², S. Batkam³

¹ GRESPI, Université de Reims Champagne-Ardenne, France, oualid.atmani@etudiant.univ-reims.fr

² GRESPI, Université de Reims Champagne-Ardenne, France, {boussad.abbes, fazilay.abbes, yuming.li}@univ-reims.fr

³ Pack 3.0, Neung sur Beuvron, France, serge.batkam@pack3-0.com

Résumé — Nous proposons dans ce travail un modèle thermo-élasto-viscoplastique pour modéliser le comportement rhéologique du polystyrène choc dans les conditions de thermoformage assisté par poinçon pour une large gamme de températures et de vitesses de déformation. Le modèle proposé est validé par des essais de poinçonnement à hautes vitesses et à différentes températures. Les résultats montrent capacité du modèle à prédire la force exercée sur le poinçon, la déformée et la distribution des épaisseurs de la feuille poinçonnée.

Mots clefs — Comportement thermo-élasto-viscoplastique, polystyrène choc, éléments finis.

1. Introduction

Le thermoformage assisté par poinçon est très utilisé dans l'industrie pour la mise en forme des thermoplastiques. Ce procédé s'effectue selon trois phases : chauffage, poinçonnage et soufflage. Le matériau sous forme de feuille d'épaisseur souvent inférieure à 2 mm est d'abord chauffé pour le ramollir et faciliter sa déformation. Les bords de la feuille sont encastrés pour empêcher son glissement lors de son étirage à l'aide du poinçon. A partir d'un certain déplacement du poinçon, dépendant du produit thermoformé, une pression d'air est appliquée pour que la feuille épouse la forme du moule. Plusieurs paramètres interviennent dans ce procédé et déterminent la qualité du produit final : la température et le type de polymère, la vitesse d'avance du poinçon, le type de matériau du poinçon, la température du poinçon...etc. La multitude des paramètres rend la modélisation de ce procédé très complexe [1-4]. L'optimisation de ce procédé nécessite souvent le recours à une méthode de type essai-erreur longue et couteuse. Le recours à la simulation numérique est alors nécessaire dès la phase de conception pour prédire les différents paramètres du procédé et ainsi minimiser la phase de réglage [4-5]. Trois phénomènes importants conditionnent la qualité du produit thermoformé : la rhéologie du matériau, le frottement feuille/poinçon et les transferts thermiques [5-6]. Ces trois phénomènes sont interdépendants et il est très difficile de les séparer d'où la complexité de la modélisation. Pour modéliser le comportement rhéologique des polymères dans le procédé de thermoformage assisté par poinçon, les modèles hyper-élastique [7], viscoélastique [5] et viscoplastique [8] sont généralement utilisés. Ces modèles ne sont souvent valables que pour une gamme limitée de températures et de vitesses de déformation.

L'objectif de ce travail est de modéliser le comportement rhéologique du polystyrène-choc HiPS (*High Impact Polystyrene*) dans les conditions de thermoformage assisté par poinçon pour une large gamme de températures et de vitesses de déformation. Pour s'affranchir 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. Le modèle a été implémenté dans le logiciel ABAQUS/Explicit et les résultats obtenus ont été comparés aux essais de poinçonnement en termes de force de poinçonnement et de distribution d'épaisseur.

2. Comportement thermomécanique du polystyrène choc

2.1. Caractérisation expérimentale

Afin d'étudier le comportement thermomécanique du polystyrène choc en fonction de la température et de la vitesse de déformation, nous avons réalisé des essais de DMA (Analyse mécanique dynamique) avec un balayage en température à une fréquence de 1 Hz et des essais de traction uni-axiale avec différentes températures et vitesses de déformations montrant la forte dépendance du HiPS à ces deux paramètres [9]. Pour se mettre dans des conditions proches de celles du thermoformage, nous avons réalisé des essais expérimentaux de poinçonnement à l'aide d'un poinçon en aluminium. Pour les différents essais, le poinçon est chauffé à la même température que le polymère pour minimiser les échanges thermiques par conduction, et est lubrifié pour minimiser le frottement HiPS/poinçon. Dans ces conditions, l'interdépendance rhéologie/frottement/transfert thermique est réduite.

2.2. Modèle de comportement thermo-élasto-viscoplastique

Le polystyrène-choc 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 . Pour décrire ce comportement, nous proposons une loi élasto-viscoplastique thermo-dépendante en adaptant la loi proposée par G'Sell [10] :

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

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

$$P(T) = P_g \exp\left(p\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_g}\right)\right) \quad (2)$$

où P_g et p sont les paramètres du modèle à identifier.

Le modèle défini par les équations (1) et (2) a été implémenté dans le code de calcul par éléments finis ABAQU/Explicit en utilisant le sous-programme utilisateur VUMAT. Les paramètres du modèle ont été ensuite identifiés par analyse inverse.

3. Résultats expérimentaux et numériques de poinçonnement

Pour montrer l'efficacité du modèle proposé à représenter le comportement du polystyrène choc à différentes températures et vitesses de déformation. Nous avons simulé l'essai de poinçonnement à trois températures (120°C, 130°C et 140°C) et à deux vitesses de poinçonnement (0.5 m/s et 1 m/s). La géométrie du modèle ainsi que le montage expérimental sont représentés sur la Figure 1. Dans nos simulations, nous avons considéré le moule, le contre moule et le poinçon 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.

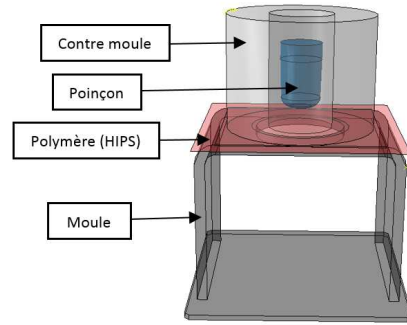


Figure 1 – Montage expérimental et modèle numérique de l'essai de poinçonnement.

La Figure 2 montre la comparaison des courbes numériques et expérimentales de poinçonnement avec lubrification pour trois températures et deux vitesses du poinçon. La force de poinçonnement augmente avec la vitesse du poinçon et diminue avec l'augmentation de la température. Le matériau est plus rigide en se rapprochant de la T_g et les effets élastiques sont dominants à grande vitesse de déformation. Le comportement mécanique du polystyrène choc dépend bien du couple vitesse/température. Les courbes sont globalement bien décrites sur les 60 mm de déplacement du poinçon sauf pour l'essai à $T = 120^\circ\text{C}$ et $V_{\text{Poinçon}} = 0.5 \text{ m/s}$ où le modèle sous-estime la force.

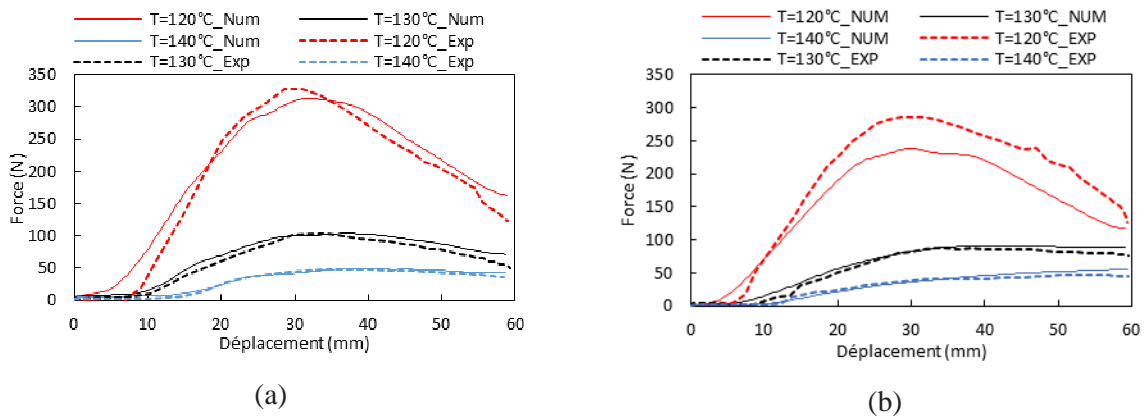


Figure 2 – Comparaison des courbes numériques et expérimentales de poinçonnement avec lubrification pour :
(a) $V_{\text{Poinçon}} = 1 \text{ m/s}$ et (b) $V_{\text{Poinçon}} = 0.5 \text{ m/s}$.

La Figure 3 montre la comparaison des épaisseurs pour le poinçonnement avec lubrification à $T = 120^\circ\text{C}$ et $V_{\text{Poinçon}} = 1 \text{ m/s}$. Le profil des épaisseurs le long de la partie centrale de la feuille est bien estimé par la simulation numérique (Figure 3(a)). On constate bien qu'en l'absence de frottement l'apport de la matière dans le fond du pot est très faible, puisque c'est le contact feuille/poinçon qui permet d'amener suffisamment de matière dans le fond du pot. La déformée finale obtenue par la simulation numérique est comparable à celle obtenue expérimentalement dans les mêmes conditions (Figure 3(b)).

4. Conclusion

Nous avons proposé un modèle thermo-élasto-viscoplastique pour modéliser le comportement rhéologique du polystyrène choc dans les conditions de thermoformage assisté par poinçon pour une large gamme de températures et de vitesses de déformation. Le modèle a été implémenté dans le

logiciel ABAQUS/Explicit en utilisant le sous-programme VUMAT. Pour s'affranchir 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 ont été comparés aux simulations numériques de poinçonnement en termes de force de poinçonnement et de distribution d'épaisseur. Le modèle proposé permet de prédire la force exercée sur le poinçon, la déformée et la distribution des épaisseurs de la feuille poinçonnée de manière satisfaisante. La prochaine étape consiste à prendre en compte le frottement et les transferts thermiques entre la feuille et le poinçon pour compléter le modèle de thermoformage assisté par poinçon.

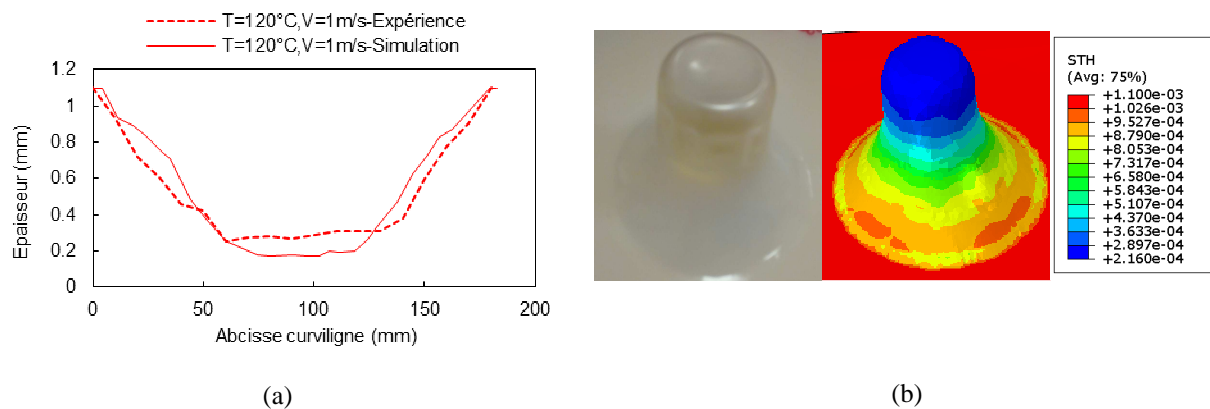


Figure 3 – Comparaison des épaisseurs pour le poinçonnage avec lubrification à $T = 120^{\circ}\text{C}$ et $V_{\text{Poinçon}} = 1 \text{ m/s}$:
 (a) Profil des épaisseurs le long du diamètre et (b) Déformée avec distribution des épaisseurs.

Références

- [1] A. Aroujalian, M.O. Ngadi, J.-P. Emond. Wall thickness distribution in plug-assist vacuum formed strawberry containers, *Polymer engineering and science*, 178–182, January 1997.
- [2] 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.
- [3] H. Hosseini, B.B. Vasilivich, A. Mehrabani-Zeinabad. Rheological modeling of plug-assist thermoforming, *Journal of Applied Polymer Science*, 4148–4152, 2006.
- [4] M. Ghobadnam, P. Mosaddegh, M. Rezaei Rejani, H. Amirabadi, A. Ghaei. Numerical and experimental analysis of HIPS sheets in thermoforming process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1079–1089, 2015.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] C. G'Sell. Instabilités de déformation pendant l'étirage des polymères solides, *Revue de Physique Appliquée*, 1085–1101, 1988.