

Simulation numérique et optimisation du procédé d'injection soufflage cycle chaud

J.BIGLIONE^a, Y.BÉREAUX^b, J.-Y.CHARMEAU^c

a. LaMCoS UMR5259 + jordan.biglione@insa-lyon.fr

b. LaMCoS UMR5259 + yves.bereaux@insa-lyon.fr

c. IMP-LMM UMR5223 + jean-yves.charmeau@insa-lyon.fr

Résumé :

Le procédé d'injection soufflage est rendu accessible aux presses d'injection standard à travers le procédé d'injection soufflage cycle chaud, sans stockage puis réchauffe de la préforme. Le but étant de rendre accessible la production de petites séries de pièces creuses à des entreprises possédant un parc machine de presse à injecter. Les pièces sont réalisées en polypropylène et sont soufflées juste après avoir été injectées. Ce processus implique que la préforme se doit d'être suffisamment malléable pour être soufflée mais suffisamment visqueuse pour éviter de se rompre durant la phase de soufflage. Ces contraintes conduisent à une fenêtre de mise en œuvre réduite, comprise entre la température de fusion du polymère et la température de cristallisation, soit le domaine où le polypropylène est à l'état amorphe mais suffisamment froid pour avoir une viscosité conséquente sans cristalliser. Ce procédé cycle chaud implique des gradients de température, de grands taux d'étirages et d'importantes cinétiques de refroidissement. Des mesures de rhéométrie à l'état fondu sont réalisées pour identifier le comportement de la matière dans la plage de température du procédé, de même que des tests de calorimétrie différentielle. Un modèle rhéologique de Cross est utilisé, avec la dépendance thermique prise en compte par une loi d'Arrhénius. Le procédé est simulé à l'aide d'un logiciel de calcul par éléments finis dédié aux écoulements de fluides complexes (POLYFLOW) dans l'espace de travail ANSYS Workbench. La géométrie autorise une approche axisymétrique, facilitant ainsi la modélisation. Le calcul transitoire est lancé sous conditions anisothermes et l'auto-échauffement est considéré. Des études de sensibilité sont réalisées et révèlent l'influence de paramètres procédé tels que le comportement du matériau, la pression de soufflage et le champ de température initial. Des mesures d'épaisseurs sont réalisées en utilisant une méthode de traitement d'image permettant l'analyse des images numérisées de pièces découpées. Les résultats simulés sont comparés aux mesures expérimentales. Le modèle est en bon accord avec les mesures.

Abstract :

The hot cycle blowing injection process is made accessible to standard injection presses through the hot cycle blowing injection process, without storage and reheating of the preform. The goal is to make the production of small series of hollow parts accessible to companies with an injection press machine park. The parts are made of polypropylene and are blown immediately after injection. This process implies that the preform must be sufficiently malleable to be blown but sufficiently viscous to avoid breaking during the blowing phase. These constraints lead to a reduced window of use, between the melting temperature of the polymer and the crystallization temperature, where polypropylene is amorphous but sufficiently cold to have a significant viscosity without crystallizing. This hot cycle process implies temperature gradients, large stretching rates and important cooling kinetics. Rheometry measurements in the molten state are performed to identify the material behavior in the process temperature range, as well as differential scanning calorimetry tests. A Cross rheological model is used, with the thermal dependence taken into account by an Arrhenius law. The process is simulated using a dedicated finite element calculation software for complex fluid flows (POLYFLOW) in the ANSYS Workbench environment. The geometry allows an axisymmetric approach, thus facilitating the modeling. The transient calculation is performed under anisothermal conditions and auto-heating is considered. Sensitivity studies are performed and reveal the influence of process parameters such as material behavior, blowing pressure and initial temperature field. Thickness measurements are performed using an image processing method allowing the analysis of digitized images of cut parts. The simulation results are compared to experimental measurements. The model is in good agreement with the measurements.

contraintes conduisent à une fenêtre de mise en œuvre réduite, comprise entre la température de fusion du polymère et la température de cristallisation, soit le domaine où le polypropylène est à l'état amorphe mais suffisamment froid pour avoir une viscosité conséquente sans cristalliser. Ce procédé cycle chaud implique des gradients de température, de grands taux d'étirages et d'importantes cinétiques de refroidissement. Des mesures de rhéométrie à l'état fondu sont réalisées pour identifier le comportement de la matière dans la plage de température du procédé, de même que des tests de calorimétrie différentielle. Un modèle rhéologique de Cross est utilisé, avec la dépendance thermique prise en compte par une loi d'Arrhénius. Le procédé est simulé à l'aide d'un logiciel de calcul par éléments finis dédié aux écoulements de fluides complexes (POLYFLOW) dans l'espace de travail ANSYS Workbench. La géométrie autorise une approche axisymétrique, facilitant ainsi la modélisation. Le calcul transitoire est lancé sous conditions anisothermes et l'auto-échauffement est considéré. Des études de sensibilité sont réalisées et révèlent l'influence de paramètres procédé tels que le comportement du matériau, la pression de soufflage et le champ de température initial. Des mesures d'épaisseurs sont réalisées en utilisant une méthode de traitement d'image permettant l'analyse des images numérisées de pièces découpées. Les résultats simulés sont comparés aux mesures expérimentales. Le modèle est en bon accord avec les mesures.

Mots clés : injection soufflage, calcul par éléments finis, polypropylène, rhéométrie dynamique, dma, cristallinité, mesure d'épaisseurs, random copolymère.

1 Introduction

L'injection étirage-soufflage est un procédé où la préforme est dans un premier temps injectée via une presse à injecter, refroidie dans le moule, stockée puis plus tard réchauffée afin d'être étirée-soufflée via une machine de soufflage pour obtenir la pièce finale [10, 11, 17, 18, 20, 24, 27].

Dans la variante du procédé dite "cycle chaud", la préforme est soufflée juste après avoir été injectée. Il n'est pas ici question d'étirage, les géométries finales étant proches de la géométrie de la préforme dans le sens de la hauteur. Il n'y a donc pas besoin d'étirer beaucoup la préforme dans cette direction et le soufflage seul est suffisant.

L'injection soufflage cycle chaud est une manière attractive de produire rapidement des petites séries de pièces via une presse à injecter standard équipée du moule adéquat. Cependant, lancer une nouvelle production peut être retardé par le temps nécessaire à concevoir une préforme permettant l'obtention d'une pièce finale avec une distribution d'épaisseur voulue assurant un bon maintien mécanique. Une succession d'essais et d'erreurs conduit à des retards, des surcoûts et une conception de préforme non-optimale. La phase de soufflage étant responsable de la répartition d'épaisseur finale, la simulation numérique de cette étape est la clé pour gagner en compréhension sur le procédé. Cependant, la simulation numérique du soufflage est un problème de mécanique complexe, car le polymère est déformé alors qu'il à l'état caoutchoutique, bien au-dessus de sa température de transition vitreuse et en dessous de son point de fusion, où ses caractères visqueux et élastique sont tous deux influents et où, concernant les polymères semi-cristallins, la question du rôle de la cristallisation durant le procédé se pose. Contrairement au procédé conventionnel, la matière n'est pas chauffée avant d'être soufflée de sorte que le champ de température avant soufflage est une conséquence directe de la phase d'injection préalable. La préforme

est en effet refroidie dans le moule à une température supérieure à la température de cristallisation du polymère et est ensuite soufflée. De plus, le couplage entre la thermique et la mécanique ne peut être évité de par la dépendance thermique de la viscosité et de par les gradients thermiques découlant de la phase d'injection [13].

Notre plan de travail est le suivant, concernant la mise en forme de flacons en polypropylène (grade injection-soufflage) :

- étude rhéologique : mesures de viscosités et de modules dynamiques à différentes températures et à différentes vitesses de refroidissement.
- simulation numérique transitoire et non-isotherme de la phase de soufflage.
- comparaison avec des mesures expérimentales d'épaisseurs obtenues par traitement d'image.

2 Caractérisation

Les copolymères random sont souvent utilisés dans les procédés de soufflage [8]. Un grade injection-soufflage est choisi, le PPR3221 fourni par Total Petrochemical. Sa température de fusion et sa température de cristallisation ont été déterminées via une analyse calorimétrique différentielle (DSC) à $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$: $T_m=149^{\circ}\text{C}$ et $T_c=113^{\circ}\text{C}$.

Des mesures de rhéométrie dynamique à différentes fréquences de sollicitation et différentes températures permettent de construire la courbe maîtresse de viscosité du matériau régissant son comportement à l'état fondu.

Le modèle de Cross est utilisé pour représenté le comportement rhéofluidifiant du matériau à l'état fondu :

$$\eta = \frac{a_T \eta_0}{1 + (a_T \lambda \dot{\gamma})^{1-n}} \quad (1)$$

avec η_0 la viscosité à cisaillement nul, λ le temps de relaxation et n l'indice de rhéofluidification.

L'effet de la température est pris en compte via une loi d'Arrhénius :

$$a_T = e^{\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ref}}} \right)} \quad (2)$$

avec R la constante des gaz parfaits, E_a l'énergie d'activation du matériau et T_{ref} la température de référence.

La validité de l'utilisation de la loi rhéofluidifiante dans les conditions du procédé est étudiée à travers la variation du temps d'attente pendant les essais de rhéométrie. Le procédé introduit de grandes vitesses de refroidissement et de grands étirages. La loi rhéofluidifiante suppose que le polymère demeure à l'état fondu et a donc un comportement amorphe. Si la cristallisation devait se produire durant le procédé, cette approche ne serait peut-être pas valide.

Une première étude consiste à explorer les propriétés mécaniques du matériau selon deux approches :

- des essais de mécanique dynamique en traction (DMA) en partant de l'état solide sont réalisés sur l'échantillon étant graduellement chauffé.

— des essais de rhéométrie dynamique sous cisaillement (RDA) sont réalisés sur l'échantillon initialement fondu et étant graduellement refroidi.

Les résultats des deux approches sont regroupés sur la **figure 1** et souligne l'importance du protocole pour caractériser le comportement du matériau en accord avec les conditions du procédé.

Le procédé conventionnel d'étirage, avec stockage puis chauffe de la préforme, correspond plus à la première approche, car partant de l'état solide [7].

Le procédé cycle chaud présenté ici a besoin de la deuxième approche, où le matériau est dans un premier temps fondu puis refroidi progressivement.

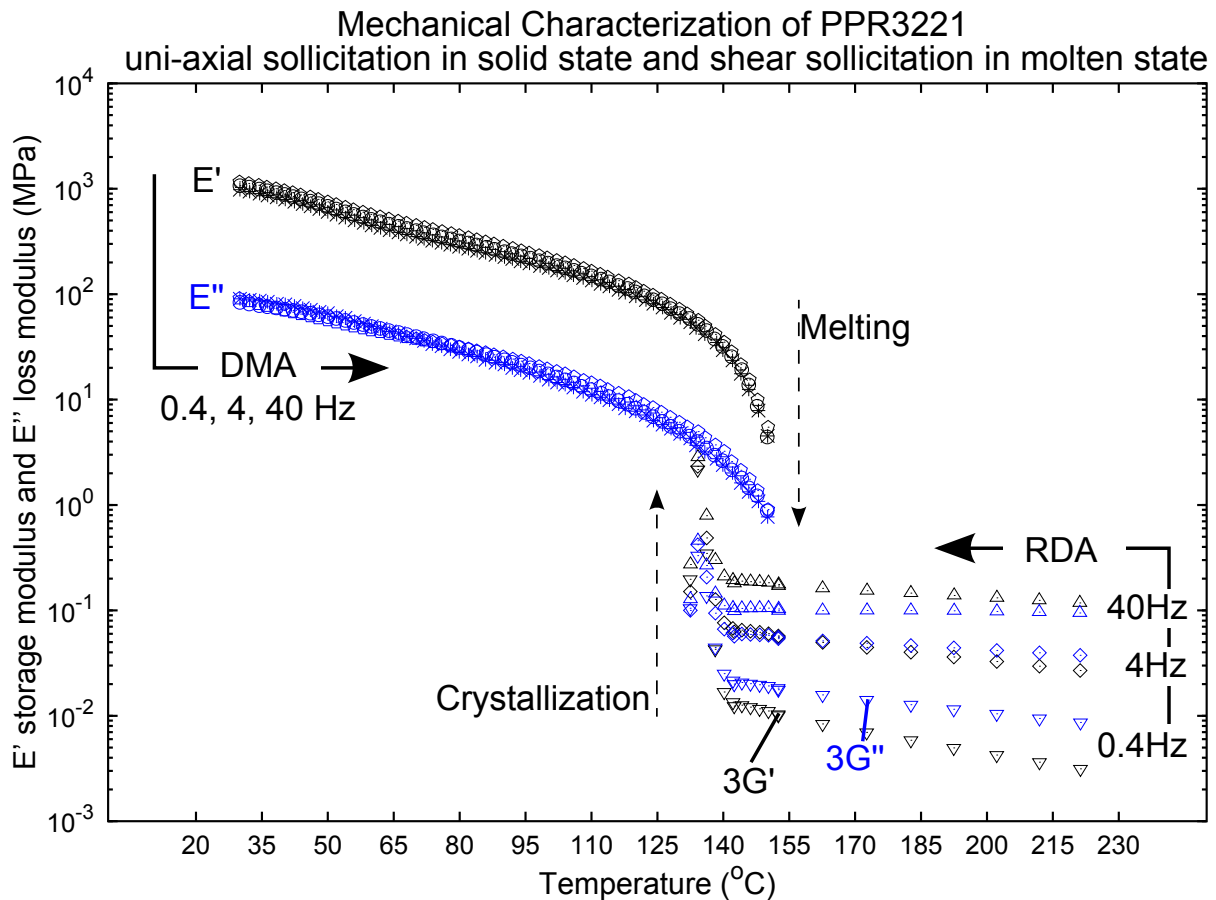


FIGURE 1 – E' (noir) and E'' (bleu) modules DMA (état solide) comparés à $3G'$ et $3G''$ modules RDA (état fondu), en fonction de la température

Les propriétés rhéologiques sont donc étudiées sous cisaillement à l'état fondu, via l'utilisation de plateaux parallèles oscillants. Des balayages en fréquences sont réalisés à différentes températures avec des temps d'attente différents entre deux mesures successives, permettant ainsi la visualisation de l'effet de la vitesse de refroidissement : plus le temps d'attente est long, plus la vitesse de refroidissement est lente. La viscosité est ensuite déduite, et les effets du taux de cisaillement, de la température, et du temps d'attente sont étudiés.

Des temps d'attente de 300s, 30s and 0s ont été étudiés, correspondant à des vitesses de refroidissement moyennes de $0.004^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, $0.028^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ et $0.067^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$. Les résultats sont présentés en **figure 2**.

L'augmentation des modules est supposée être l'expression de la cristallisation. Il apparaît alors que plus le refroidissement est rapide, plus basse est la température à laquelle la cristallisation se produit [6]

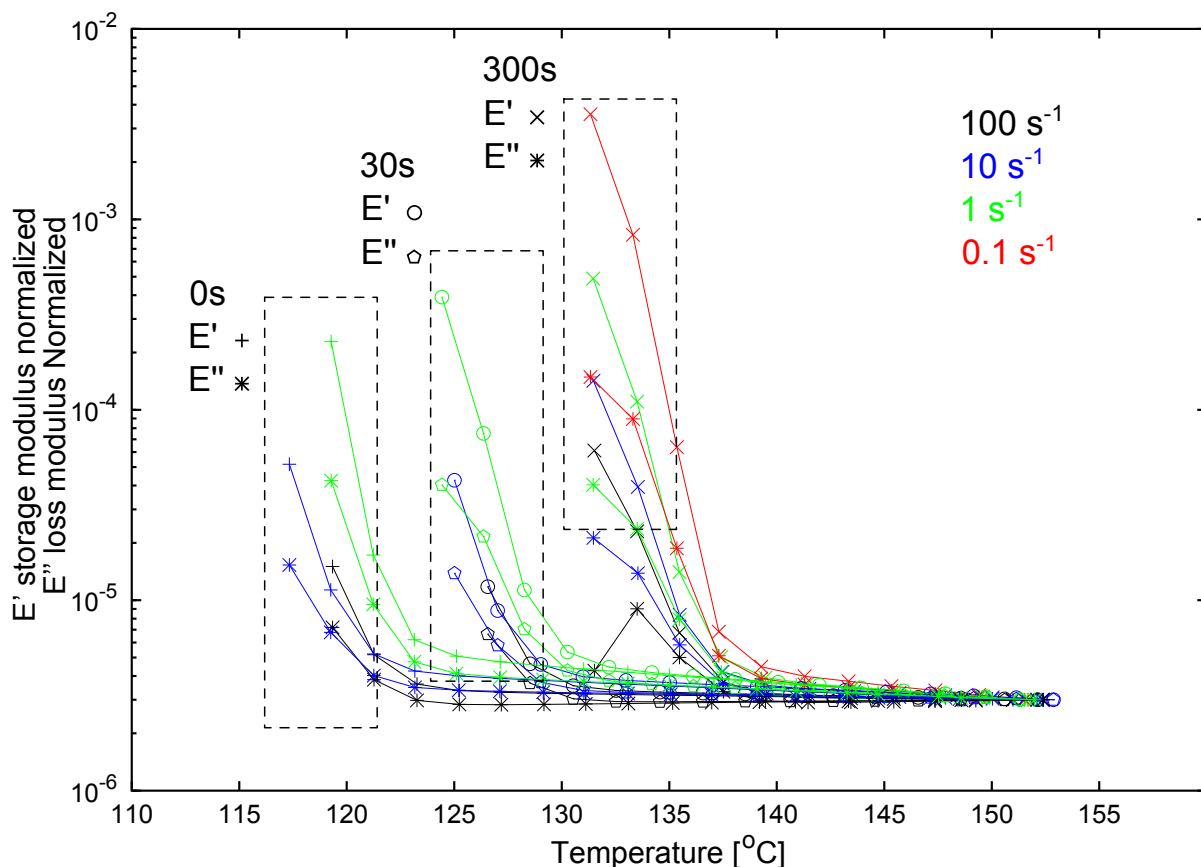


FIGURE 2 – E' et E'' modules pour différents temps d'attente à différentes fréquences de sollicitation - chaque lot de données est normée par le premier module (mesuré à la première température imposée)

[14] [21] [23] [22]. Etant donné que l'injection de la préforme introduit une vitesse de refroidissement moyenne bien supérieure à $15^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, il vient que la loi choisie est légitime.

3 Résultats

La phase de soufflage est modélisée via un logiciel commercial de calcul par éléments finis : POLYFLOW. Ce dernier est spécialisé dans la résolution des problèmes d'écoulement faisant intervenir des fluides complexes [1]. POLYFLOW utilise une approche eulérienne avec les champs de vitesse et de pression comme inconnues.

La géométrie permet une approche axisymétrique. Deux domaines sont définis : la préforme et le moule. Un maillage 2D composé uniquement d'éléments quadrangles pour la préforme est utilisé.

Le calcul est sous condition non-isothermes. La température de la broche servant au moulage interne de la préforme est imposée à 130°C et la température initiale de la matière, ie la température d'injection, est fixée à 240°C .

La pression d'air est imposée constante le long du bord interne de la préforme et évolue selon une loi thermodynamique prenant en compte la variation du volume interne. Un problème de contact est défini entre le moule et le bord externe de la préforme afin que les noeuds en contact avec le moule soient entravés. Les paramètres de la loi de Cross et d'Arrhénius permettant la modélisation du comportement du polymère sont présentés dans le **tableau 1**.

La **figure 3** montre l'évolution de la préforme durant le soufflage.

TABLE 1 – Paramètre de la modélisation du comportement du PPR3221 :

η_0 [Pa.s]	λ [s]	n	E_a [J.mol ⁻¹]	T_{ref} [°C]
$2.6E4$	1.37	0.35	34 600	180

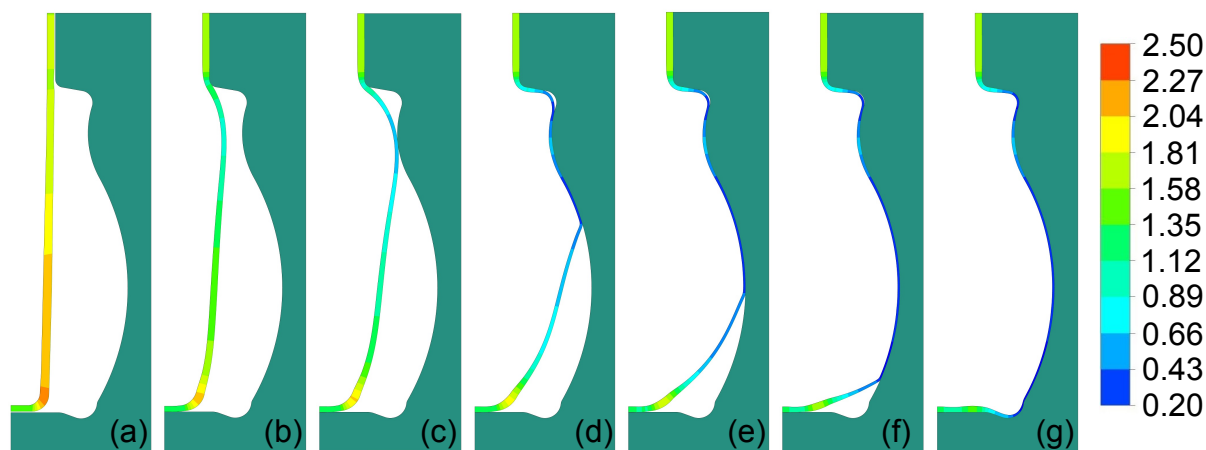


FIGURE 3 – Résultats de la modélisation de la phase de soufflage pour différents pas de temps - la carte couleur représente l'épaisseur de la préforme

Six échantillons ont été découpés en deux dans le sens de la hauteur et chaque moitié a été numérisée avec une résolution de 2400 dpi. Les épaisseurs sont ensuite déterminées par traitement d'image après un seuillage afin d'obtenir une image binaire. Les contours des bouteilles sont ensuite identifiés et les épaisseurs locales mesurées. L'erreur de la méthode est estimée à ± 1 pixel, soit 10 μm . Douze répartitions d'épaisseur sont ainsi mesurées. Une répartition d'épaisseur médiane est déduite et comparée à la simulation.

Les répartitions d'épaisseurs sont représentées en fonction de l'abscisse curviligne. La **figure 4** présente la comparaison entre la répartition d'épaisseur numérique et la répartition d'épaisseur médiane.

Les zones grisées ne sont pas considérées dans la comparaison. Concernant les autres régions, il y a une concordance entre simulation et expérience de 73% pour une tolérance de 100 μm et 45% pour une tolérance de 50 μm .

L'opération de découpe des échantillons est la première source d'erreur identifiée. L'angle de la lame, la position de la lame ou encore l'épaisseur de la lame sont autant de paramètres amenant de la dispersion sur les mesures. Cependant, les tendances observées expérimentalement et numériquement sont en bon accord.

4 Conclusion

Une méthode de travail a été définie pour la caractérisation mécanique du matériau dans la gamme de température introduite dans le procédé : au-dessus de la température de cristallisation en partant de l'état fondu. La validité de la loi de comportement choisie a été étudiée. La légitimité de cette loi a été assurée via la visualisation de l'effet de la vitesse de refroidissement sur la cristallisation via des essais de rhéométrie dynamique. Les résultats de la simulation sont en bon accord avec les mesures expérimentales.

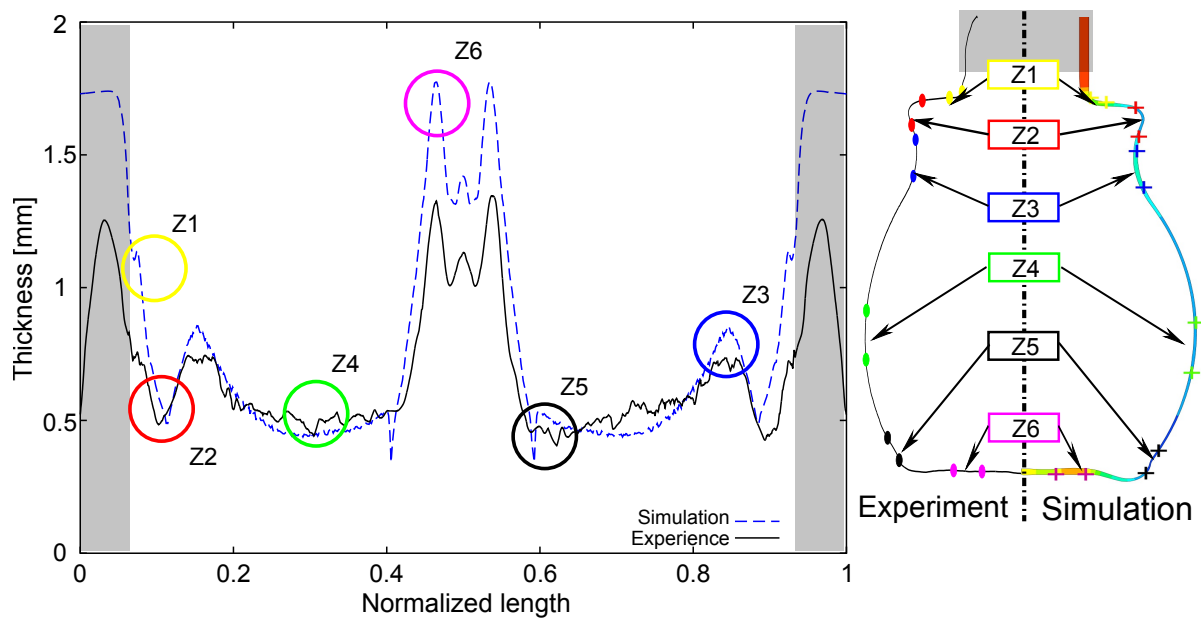


FIGURE 4 – Comparaison entre expérience et simulation

Références

- [1] ANSYS : Ansys polyflow user's guide. release 13 · 0 (2010)
- [2] Bellet, M., Monasse, B., Agassant, J.F. : Simulation numérique des procédés de soufflage. Techniques de l'ingénieur (in french) (2002)
- [3] Béreaux, Y., Charmeau, J.Y., Balcaen, J. : Optical measurement and modelling of parison sag and swell in blow moulding. International Journal of Material Forming **5** (2011)
- [4] Biglione, J., Béreaux, Y., Charmeau, J.Y., Balcaen, J., Chhay, S. : Numerical simulation and optimization of the injection blow molding of polypropylene bottles - a single stage process. International Journal of Material Forming **8** (2015)
- [5] Bordival, M., Schmidt, F.M., Maout, Y.L., Velay, V. : Optimization of preform temperature distribution for the stretch-blow molding of pet bottles : Infrared heating and blowing modeling. Polymer Engineering and Science **49** (2009)
- [6] Devaux, N. : Influence d'un cisaillement sur les premiers stades de la cristallisation du polypropylène. Ph.D. thesis, Thèse de l'École des Mines de Paris (in french) (2003)
- [7] Duffo, P., Monasse, B., Haudin, J.M., G'Sell, C., Dahoun, A. : Rheology of polypropylene in the solid state. Journal of Materials Science **30** (1995)
- [8] Duval, C. : Polypropylènes (pp). Techniques de l'ingénieur (in french) (2004)
- [9] Fatt, M.S.H., Ouyang, X. : Three-dimensional constitutive equations for styrene butadiene rubber at high strain rates. Mechanics of Materials **40** (2008)
- [10] Groot, J.A.W.M., Giannopapa, C.G., Mattheij, R.M.M. : A computer simulation model for the stretch blow moulding process of polymer containers. ASME 2010 (2010)
- [11] Hopmann, C., Michaeli, W., Rasche, S. : Fe-analysis of stretch-blow moulded bottles using an integrative process simulation. The 14th International ESAFORM Conference on Material Forming (2011)

- [12] Huang, H.X., Yin, Z.S., Liu, J.H. : Visualization study and analysis on perform growth in polyethylene terephthalate stretch blow molding. *Journal of Polymer Applied Science* **103** (2007)
- [13] Kamal, M.R., Kalyon, D.M., Tan, V. : Anisotropy and dimension of blow-molded polyethylene bottles. *Polymer Engineering and Science* **22** (1982)
- [14] Koscher, E., Fulchiron, R. : Influence of shear on polypropylene crystallization : morphology development and kinetics. *Polymer* **43** (2002)
- [15] Lee, D.K., Soh, S.K. : Prediction of optimal preform thickness distribution in blow molding. *Polymer Engineering and Science* **36** (1996)
- [16] Luersen, M.A., Riche, R.L. : Globalized nelder-mead method for engineering optimization. *Computer and Structures* **82** (2004)
- [17] Menary, G.H., Tan, C.W., Armstrong, C.G., Salomeia, Y., Harkin-Jones, E.M.A. : Validating injection stretch-blow molding simulation through free blow trials. *Polymer Engineering and Science* **50** (2010)
- [18] Pham, X.T., Thibault, F., Lim, L.T. : Modeling and simulation of stretch blow molding of polyethylene terephthalate. *Polymer Engineering and Science* **44** (2004)
- [19] Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P. : Numerical recipes in Fortran - The Art of Scientific Computing - Second Edition. Cambridge University Press ISBN 0-51-43064-X (1994)
- [20] Schmidt, F.M., Agassant, J.F., Bellet, M. : Experimental study and numerical simulation of the injection stretch/blow molding process. *Polymer Engineering and Science* **38** (1998)
- [21] Thevenon, A., Fulchiron, R. : Elongational behavior of amorphous polymers in the vicinity and above the glass transition temperature. *Polymer Testing* **32** (2013)
- [22] Thevenon, A., Fulchiron, R. : Evolution of poly(propylene) morphology in the rubbery state under uniaxial strain. *Macromolecular Materials and Engineering* **299** (2014)
- [23] Thevenon, A., Fulchiron, R. : A thermomechanical modeling approach for the structural changes in semi-crystalline polymers under elongational strain. *Journal of Materials Science* **49** (2014)
- [24] Thibault, F., Malo, A., Lanctot, B., Diraddo, R. : Preform shape and operating condition optimization for the stretch blow molding process. *Polymer Engineering and Science* **47** (2007)
- [25] Wang, S., Makinouchi, A., Okamoto, M., Kotaka, T., Maeshima, M., Ibe, N., Nakagawa, T. : Viscoplastic material modeling for the stretch blow molding simulation. *International Polymer Processing* **XV** (2000)
- [26] Yang, L.M., Shim, V.P.W., Lim, C.T. : A visco-hyperelastic approach to modeling the constitutive behavior of rubber. *International Journal of Impact Engineering* **24** (2000)
- [27] Yang, Z.J., Harkin-Jones, E., Menary, G.H., Armstrong, C.G. : A non-isothermal finite element model for injection stretch-blow molding of pet bottles with parametric studies. *Polymer Engineering and Science* **44** (2004)