

Validation expérimentale de l'échauffement d'un polymère en écoulement instationnaire dans un canal cylindrique

Yannek WIELHORSKI^{1*}, Nicolas LEFEVRE¹, Pierre MOUSSEAU², Yvon JARNY¹,
Didier DELAUNAY¹

¹Laboratoire de Thermocinétique de Nantes, LTN, UMR 6607, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, site de la Chantrerie, rue Christian Pauc BP 50609, 44306 Nantes Cedex 3

²ERT OPERP 1086, GEPEA, IUT de Nantes, 2, avenue Professeur Jean Rouxel, 44475 Carquefou

* (auteur correspondant : yanneck.wielhorski@univ-nantes.fr)

Résumé – Lors de la mise en forme de polymères, le phénomène de dégagement de chaleur résultant de la dissipation visqueuse au sein de l'écoulement joue un rôle important sur le champ thermique au sein du polymère. Notre étude est focalisée sur le champ de température dans le canal d'alimentation des procédés d'injection ou dans les filières d'extrusion. Les régimes non stationnaires considérés sont imposés par une variation temporelle de la pression en entrée du canal qui reste constamment rempli de matière (pas de frontière libre).

Nomenclature

Symboles latins

L	longueur du canal, m
Rc	rayon du canal, m
p	pression, Pa
T	température, K
\vec{U}	vecteur vitesse, $m.s^{-1}$
r	variable radiale
z	variable axiale
Re	nombre de Reynolds
Ca	nombre de Cameron
St	nombre de Stokes
Br	nombre de Brinkman
$Cp_{ac,f}$	capacité calorifique (acier, fluide), $J.K^{-1}.kg^{-1}$

Symboles grecs

$\lambda_{ac,f}$	conductivité thermique (acier, fluide), $W.m^{-1}.K^{-1}$
$\rho_{ac,f}$	masse volumique (acier, fluide), $kg.m^{-3}$
$\dot{\gamma}$	vitesse de cisaillement, s^{-1}
η	viscosité, $Pa.s$
α	coefficient de dilatation isobare, K^{-1}
Φ	terme de dissipation visqueuse, $W.m^{-3}$
∇	opérateurs Nabra
Γ	frontière du domaine
$\Omega_{0,1}$	domaine (polymère ou acier) spatial

1. Introduction

L'étude porte sur l'analyse expérimentale et numérique des transferts de chaleur au sein d'un écoulement de polymère fondu dans un canal instrumenté. Cette modélisation requiert des propriétés rhéologiques et thermiques ainsi que des conditions aux limites et initiales bien maîtrisées. La démarche consiste à réaliser et installer une buse cylindrique en sortie de vis de plastification (procédés d'injection et d'extrusion) en vue de caractériser le polymère en situation réelle d'écoulement et de déterminer les conditions d'entrée dans les outillages.

Ce travail est le prolongement de deux études [1], [2] dont les résultats ont permis la mise au point d'un nouveau dispositif le moins perturbateur possible, bien régulé thermiquement et résistant bien aux pressions élevées. Les parois de la buse sont instrumentées en micro-thermocouples. Les relevés de température et de pression permettront de valider les lois de comportement rhéologique du polymère dans les conditions réelles du procédé de mise en

forme, et via la résolution de problèmes inverses, de reconstruire le champ thermique dans le canal, notamment en estimant les conditions thermiques d'entrée.

Cet article décrit quelques résultats expérimentaux, ainsi que la validation de la résolution numérique des équations de bilan qui décrivent l'écoulement et les transferts thermiques couplés, dans les conditions d'usage de mise en forme. La simulation numérique est menée avec le logiciel COMSOL®, qui permet le couplage multiphysique avec une souplesse intéressante.

2. Description du dispositif expérimental

La buse instrumentée, figure 1, est à géométrie cylindrique. Le canal situé dans l'axe du cylindre mesure $L = 198\text{mm}$ de long, son rayon est $R_c = 2\text{mm}$. La régulation de température du cylindre est réalisée par quatre zones de chauffage indépendantes, deux sont situées à la surface externe du cylindre et deux dans la section droite du cylindre, en entrée et en sortie du canal. Les températures de consigne sont notées $Tb_i, i = 1,..4$. Deux rangées de quatre micro-thermocouples (diamètre $\phi = 80\mu\text{m}$) ont été implantées dans la paroi du cylindre selon le schéma de la figure 2, à la distance $r = 2,5\text{mm}$ et $r = 12\text{mm}$ de l'axe du cylindre aux abscisses $z_k = (k - 1) \times 5,6\text{cm}, k = 1..4$, ils sont notés respectivement $TC_k^{inv}, k = 1,..,4$ et $TC_k^{cl}, k = 1,..,4$.

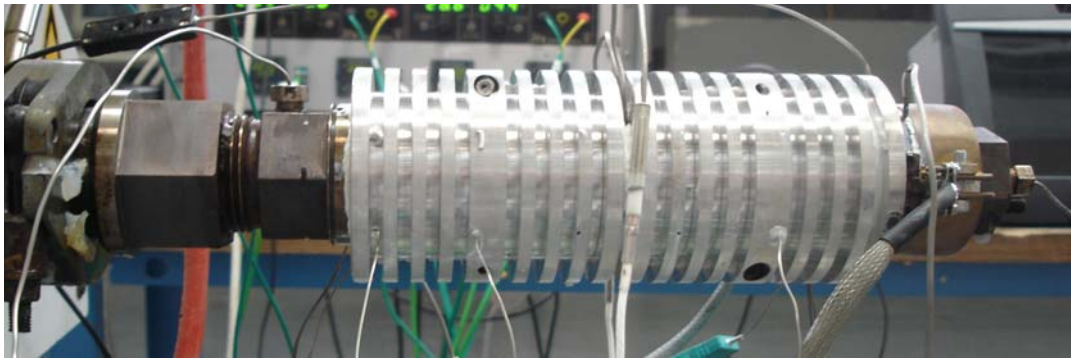


Fig. 1 : Photo de la buse instrumentée et montée sur l'extrudeuse

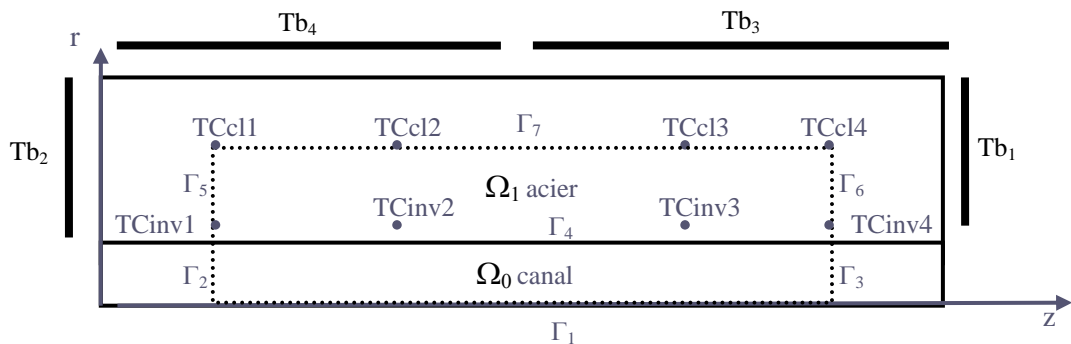


Fig. 2 : Schéma du cylindre instrumenté – (échelle non respectée)

3. Exemples de mesures expérimentales

Plusieurs campagnes d'essais ont été réalisées, à la fois sur un extrudeur mono-vis et sur une presse à injecter, avec différents polymères, sous différentes conditions de température et de pression. Nous présentons les résultats d'un seul essai sur l'extrudeur avec le polyéthylène

Dowlex 2042 E. La température du polymère à l'entrée du canal est inconnue, cependant elle est mesurée en sortie d'extrudeur et est représentée figure 3b. Les températures de consigne de la régulation thermique de la buse sont maintenues constantes pendant toute la durée (= 15 min.) de l'essai : $Tb_1 = 226,5^{\circ}\text{C}$, $Tb_2 = 227,5^{\circ}\text{C}$, $Tb_3 = 221,2^{\circ}\text{C}$, $Tb_4 = 221,8^{\circ}\text{C}$. L'essai commence par une mise en régime stationnaire, avec une vitesse de vis $V_1 = 20\text{tr.}\text{min}^{-1}$, puis il comporte une phase transitoire pour atteindre un second régime stationnaire à la vitesse $V_2 = 60\text{tr.}\text{min}^{-1}$, et se termine après une nouvelle phase transitoire pour revenir au premier état. Le débit massique, mesuré pour chaque état stationnaire, s'est établi à : $Q_1^{mes} = 0,30 \pm 0,03\text{g.}\text{s}^{-1}$ et $Q_2^{mes} = 1,00 \pm 0,03\text{g.}\text{s}^{-1}$. La variation de pression mesurée en amont du canal est représentée sur la figure 3a, et les évolutions temporelles relevées par les huit micro-thermocouples, sur la figure 4.

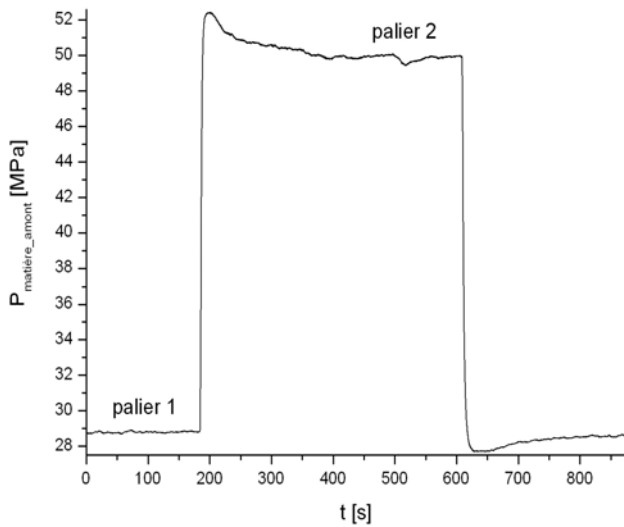


Fig. 3a : Evolution de la pression

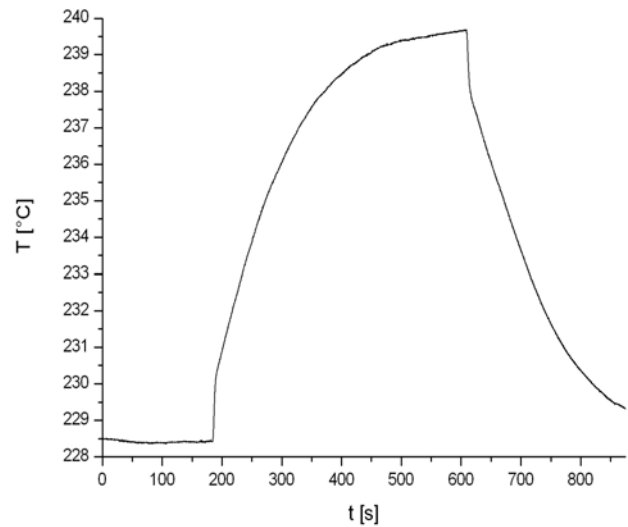


Fig. 3b : Température matière en sortie d'extrudeur

Fig. 3 : Evolution de la pression et de la température mesurées en amont de la buse

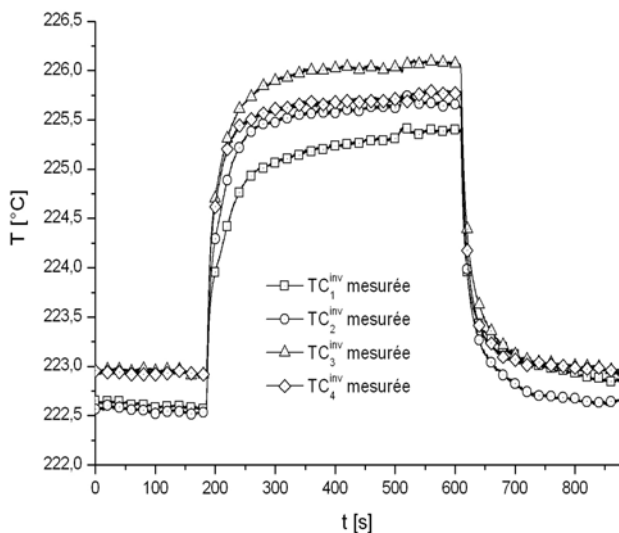


Fig. 4a : Thermocouples situés à $r=2,5\text{mm}$

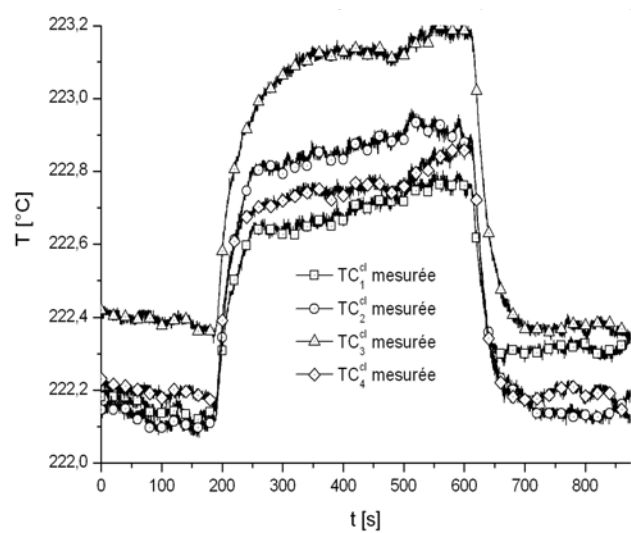


Fig.4b : thermocouples situés à $r=12\text{mm}$

Fig. 4 : Evolution temporelle des températures mesurées

nombres sans dimension \ palier	1 ^{er} palier	2 nd palier		
Reynolds : $Re = \frac{\rho \bar{V} R}{\eta}$	$\approx 10^{-5}$	$\approx 10^{-5}$	masse volumique	$\bar{\rho} = 745 \text{kg.m}^{-3}$
Stokes : $St = \frac{\eta \bar{V}}{\rho g R^2}$	$\approx 6.10^3$	$\approx 2.10^4$	section de canal	$S = 1,3.10^{-5} \text{m}^2$
Cameron : $Ca = \frac{aL}{\bar{V} R^2}$	$\approx 0,23$	$\approx 0,07$	vitesse moyenne du fluide	$\bar{V}_1 = 3,2 \text{cm.s}^{-1}$
Brinkman : $Br = \frac{\eta \bar{V}^2}{\lambda \Delta T}$	≈ 17	≈ 24		$\bar{V}_2 = 10,7 \text{cm.s}^{-1}$

Tableau 1 : Grandeurs caractéristiques de l'écoulement et des transferts thermiques

Les conditions d'écoulement pendant cet essai sont caractérisées par les nombres adimensionnels du tableau 1. On constate alors que, d'après le nombre de Reynolds, l'écoulement est toujours laminaire. De plus, le nombre de Cameron nous permet de dire que, dans les deux cas, le régime thermique est dans le régime dit « de transition », i-e entre le régime d'équilibre ($Ca \geq 1$) et le régime dit adiabatique ($Ca \leq 10^{-2}$). Par conséquent, la température peut se diffuser dans l'acier même si on est quand même plus proche du régime adiabatique que du régime d'équilibre thermique. Enfin, on peut dire, d'après le nombre de Brinkman, que la dissipation visqueuse est toujours importante par rapport au flux de chaleur par conduction, particulièrement pour le 2nd palier.

4. Comparaison entre le modèle numérique et l'expérience

4.1 Equations du modèle numérique

Les propriétés thermo-physiques des matériaux sont résumées dans le Tableau 2.

	C_p $J.K^{-1}.kg^{-1}$	λ $W.m^{-1}.K^{-1}$	ρ $kg.m^{-3}$
PE 2042E	2650	0,3	745
Acier Inox Duplex Z38	500	15	7800

Tableau 2 : Caractéristiques des matériaux utilisés pour la simulation

La rhéologie du polymère est décrite par une loi du type Carreau-Yasuda avec une thermo-dépendance suivant une loi d'Arrhénius [2]. Le système d'équations du modèle numérique associé à ce problème de transfert, permettant de déterminer numériquement le champ thermique T dans le domaine $\Omega_0 \cup \Omega_1$ de la buse et le champ de vitesse U dans le canal Ω_0 , est caractérisé par un fort couplage dû à la rhéologie thermo-dépendante du polymère et au terme de dissipation visqueuse Φ . Les frontières et les domaines sont spécifiés sur la figure 2.

<p>dans Ω_0 :</p> $\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{U}) = 0 \\ \rho_f C_{pf} \frac{DT}{Dt} = \nabla(\lambda_f \bar{\nabla} T) + \Phi + \alpha T \frac{\partial P}{\partial t} \\ \rho_f \frac{D\bar{U}}{Dt} = -\bar{\nabla} p + \rho_f \bar{g} + \nabla \cdot \left[\eta \left(\bar{\nabla} \bar{U} + {}^t \bar{\nabla} \bar{U} \right) \right] \end{cases}$	<p>dans Ω_1 :</p> $\rho_{ac} C_{pac} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda_{ac} \bar{\nabla} T)$
---	---

avec $\eta(T, \dot{\gamma}) = \frac{784,82 \cdot \exp\left(\frac{1404,15}{T}\right)}{\left(1 + (0,0106 \cdot \dot{\gamma})^{0,298}\right)^{\frac{1}{0,298}}}$ viscosité dynamique, $\alpha = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p$, le coefficient de

dilatation isobare et $\Phi = \eta \left[\overline{\nabla \bar{U}} + \overline{\nabla \bar{U}} - \frac{2}{3} \left(\overline{\nabla \bar{U}} \right) I \right] : \overline{\nabla \bar{U}}$ le terme source de dissipation visqueuse. Sur les frontières du domaine, on a les conditions aux limites suivantes :

sur Γ_1	condition d'axi-symétrie	sur Γ_4	$T _{\Gamma_4^+} = T _{\Gamma_4^-}$ et $V _{\Gamma_4} = 0 m.s^{-1}$
sur Γ_2	$T = T(r, t) = \bar{T}_0(t)$ et $P(r, t) = \bar{P}_0(t)$	sur Γ_5 et Γ_6	$T = T(r, t)$
sur Γ_3	$\frac{\partial T}{\partial \bar{n}} = 0$ et $P(r, t) = P_s = 10^5 Pa$	sur Γ_7	$T = T(z, t)$

La pression $\bar{P}_0(t)$ et la température $\bar{T}_0(t)$ à l'entrée du canal, imposées en conditions aux limites sur Γ_2 , sont déterminées à partir des mesures, figures 3a et b. La pression est corrigée des pertes de charge singulières dues au convergent en entrée de buse. Les conditions aux limites thermiques pour les frontières Γ_5 , Γ_6 et Γ_7 sont obtenues par interpolation des températures mesurées, respectivement entre TC_1^{inv} et TC_1^{cl} , entre TC_4^{inv} et TC_4^{cl} et entre TC_1^{cl} et TC_4^{cl} (voir figure 2).

4.2 Comparaison mesures/calculs en régime stationnaire

La validation du modèle numérique est obtenue en régime stationnaire pour les deux paliers de pression, en comparant d'une part, figure 5, les températures calculées aux points de mesure TC_2^{inv} et TC_3^{inv} ($r = 2,5mm$) et d'autre part les débits matières calculés et mesurés, la simulation numérique donne $Q_1^{cal} = 0,2995 g.s^{-1}$ et $Q_2^{cal} = 1,008 g.s^{-1}$, valeurs analogues à celles mesurées.

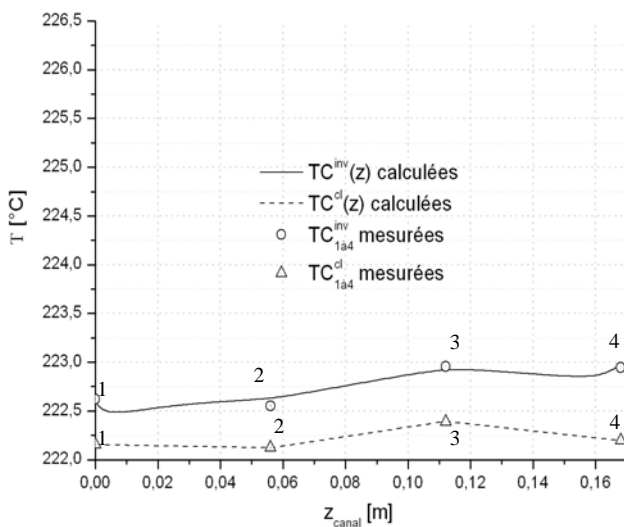


Fig. 5a : 1^{er} palier

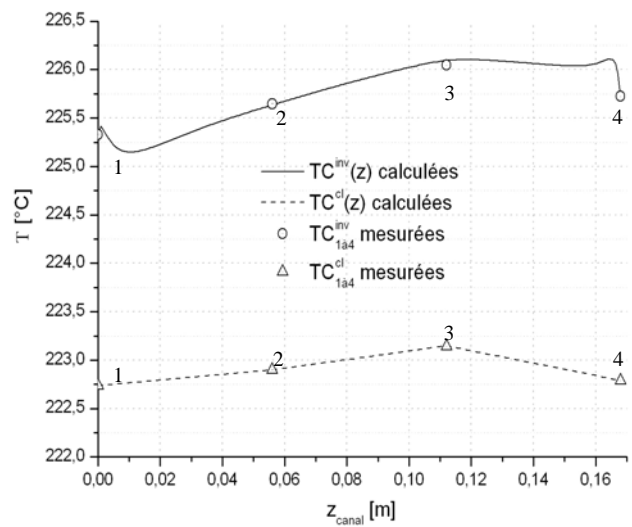


Fig. 5b : 2nd palier

Fig. 5 : Distribution axiale de la température à $r=2,5mm$ et $12mm$ pour les deux paliers de pression

La figure 6 montre le champ thermique calculé dans le canal pour les deux régimes stationnaires dans les sections droites des points de mesure. A faible débit, l'échauffement tend à se répartir sur toute la section, en sortie de canal, alors qu'à fort débit l'échauffement plus important reste localisé près de la paroi (proche du régime adiabatique). Ces différences sont caractérisées par le nombre de Cameron, voir tableau 1.

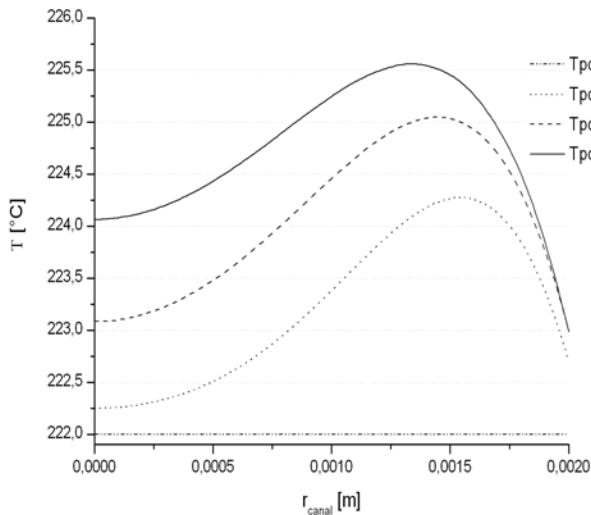


Fig. 6a : 1^{er} palier

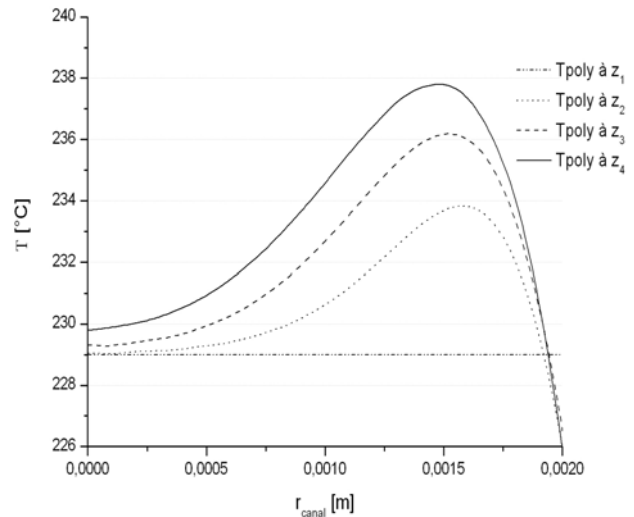


Fig. 6b : 2nd palier

Fig. 6 : Profils de température du polymère dans les sections droites des points de mesure

5. Conclusion

Cette étude expérimentale et numérique a montré la fiabilité du dispositif expérimental conçu pour étudier les transferts dans les conditions de mise en forme des polymères, ainsi que la faisabilité de la modélisation sous COMSOL®. La validation du calcul par les mesures (température et débit) en régime stationnaire est satisfaisante. Les échauffements significatifs non uniformes prédits par le modèle sont caractéristiques de ce type d'écoulement.

L'étude en cours consiste à simuler les phases transitoires et à discriminer l'influence de la source thermique due à la dissipation visqueuse et celle du profil de température en entrée du canal.

Références

- [1] Karkri M., Transferts de chaleur dans un écoulement stationnaire de polymère fondu dans une filière d'extrusion : métrologie thermique et technique inverse, thèse de doctorat, EPUN Nantes (2004)
- [2] Pujos C., Estimation de la rhéologie d'un polymère dans une filière d'extrusion – Simulation d'écoulement avec transferts thermiques et inversion de mesures, thèse de doctorat, ENSCPB Bordeaux (2006)
- [3] J.-F. Agassant, P. Avenas, J.-Ph. Sergent [*et al.*], La mise en forme des matières plastiques, Paris Technique & Documentation-Lavoisier (1996)

Remerciements

Cette étude est financée dans le cadre du programme régional PRocédés EMergents « PREMS », de la région Pays de la Loire.