

Etude numérique d'une buse instrumentée pour la modélisation thermorhéologique des procédés de mise en forme des polymères

Yanneck 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

²Laboratoire GEPEA, IUT de Nantes, 2, avenue Professeur Jean Rouxel, 44475 Carquefou Cedex

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

Résumé – Lors de la mise en forme de polymères, un phénomène de dégagement de chaleur résultant de la dissipation visqueuse au sein de l'écoulement joue un rôle important sur le champ thermique du polymère. En effet, leur faible conductivité thermique et leur comportement très visqueux engendrent selon les vitesses de cisaillement des échauffements pouvant être assez conséquents. Notre étude sera focalisée sur le champ de température dans le canal d'alimentation des procédés d'injection ou d'extrusion. Les régimes in stationnaires considérés sont imposés par une variation de la pression en entrée du canal qui reste constamment rempli de matière (pas de frontière libre). On s'intéressera également au régime périodique établi typique du procédé d'injection.

Nomenclature

Symboles latins

L longueur, m

p pression, Pa

T température, K

V vitesse, $m.s^{-1}$

r variable radiale

z variable axiale

n indice de pseudo-plasticité

Re nombre de Reynolds

Pez nombre de Péclet suivant z

St nombre de Stokes

$Cp_{ac,f}$ 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}

μ viscosité, $Pa.s$

Φ terme de dissipation visqueuse, $W.m^{-3}$

∇ opérateurs Nabla

Γ conditions limites

$\Omega_{0,1}$ domaine (polymère ou acier)

β coefficient de piezo-dépendance

1. Introduction

La mise en forme des polymères est un processus complexe notamment par les sollicitations thermomécaniques que subit le fluide. La modélisation numérique joue alors un rôle prépondérant. L'étude qui va suivre portera sur la thermique d'un écoulement de polymère fondu dans une buse d'injection. Cette modélisation requiert des propriétés rhéologiques et thermiques ainsi que des conditions aux limites et initiales bien maîtrisées. C'est dans ce cadre que se situe l'étude dont l'objectif est de mettre au point une buse placée en sortie de vis de plastification (procédé d'injection ou d'extrusion) permettant à terme 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] et [2]. Un objectif important est de mettre au point un dispositif le moins intrusif possible, bien maîtrisé

thermiquement et résistant bien aux pressions élevées. Les parois de la buse sont instrumentées et des algorithmes inverses permettront de remonter aux comportements du polymère (rhéologie, conditions thermiques d'entrée). Le fonctionnement de la buse est original par rapport à ce qui existe par ailleurs en ce que les champs de température, de pression et vitesse sont instationnaires. L'étude qui utilise les caractéristiques d'un polymère industriel, est menée avec le logiciel COMSOL®, qui permet le couplage multiphysique avec une souplesse intéressante.

L'objet de ce travail préliminaire est de tester la faisabilité numérique de la résolution du problème direct de l'écoulement et des transferts thermiques couplés, dans les conditions d'usage de la buse expérimentale en cours de construction.

2. Modèle numérique

2.1. Schéma de la buse

La buse réalisée pour notre étude est un canal à géométrie cylindrique, ce qui permet de réduire des pertes thermiques latérales mal contrôlées dans le cas de la filière à section rectangulaire utilisée dans [1] et [2], et d'éviter les perturbations qui en résultent sur la solution du problème direct et a fortiori du problème inverse. Cette géométrie cylindrique permet aussi d'avoir une meilleure tenue mécanique évitant ainsi les fuites de matière au niveau des vis ou des plans de joint pour des pressions élevées. En outre, cette buse a été conçue afin de fonctionner aussi bien sur une presse à injecter que sur une extrudeuse. L'écoulement s'effectue à l'intérieur d'un cylindre creux de longueur $L=2.10^{-1}$ m, de rayon extérieur $1,5.10^{-2}$ m. Le rayon du canal est de 2.10^{-3} m. Les micro-thermocouples de mesures qui relèveront l'information additionnelle nécessaire pour la méthode inverse sont positionnés dans la paroi en l'acier (domaine Ω_1) à $r=2,5$ mm et à $z = 1,5 ; 7,1 ; 12,7$ et $18,3$ cm à partir de l'entrée du canal. Le domaine spatial d'intégration résultant de la géométrie cylindrique est représenté sur la Figure 1.

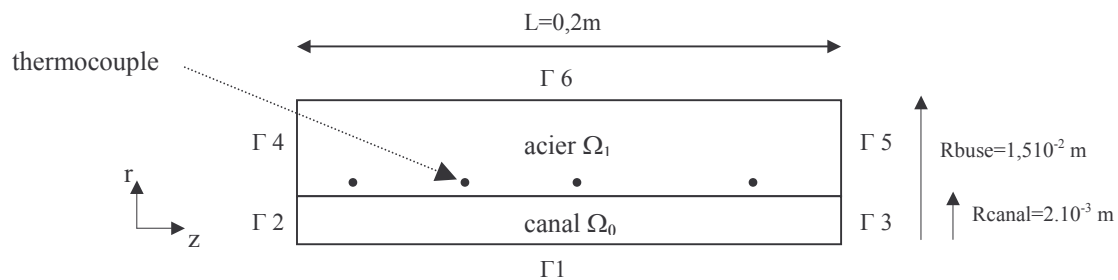


Figure1 : Description schématique du domaine spatial d'intégration

La modélisation est 2D axisymétrique en écoulement laminaire. En effet, le nombre de Reynolds est très faible ($Re \approx 10^{-4}$) car la dimension du canal est petite et la viscosité du fluide est grande (10^3 - 10^4 Pa.s). De plus, le différentiel de pression étant imposé selon l'axe de l'écoulement Oz , ceci nous permet de ne considérer que la composante de la vitesse suivant z soit $\vec{V}(0,0,w)$. Enfin, pour des raisons simplificatrices, cette composante ne dépendra que de r (modèle incompressible et axisymétrique).

2.2. Modélisation

2.2.1 Equations du modèle

Les équations du modèle sont couplées par la rhéologie thermo-dépendante du polymère et par le terme de dissipation visqueuse $\Phi = \mu(\dot{\gamma}, T, p) \cdot \dot{\gamma}^2$:

$$\text{dans } \Omega_0 \text{ et } \Omega_1 : \begin{cases} \nabla \cdot \vec{V} = 0 \\ \rho_f \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right) = -\vec{\nabla} p + \rho_f \vec{g} + \nabla \cdot \left[\mu(\dot{\gamma}, T, p) \left(\nabla \vec{V} + {}^t \nabla \vec{V} \right) \right] \\ \rho_f C_{pf} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\lambda_f \vec{\nabla} T) + \Phi(\dot{\gamma}, T, p) \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{dans } \Omega_1 : \quad \rho_{ac} C_{pac} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{ac} \vec{\nabla} T) \quad (2)$$

sur Γ_1 ($r = 0$ et $0 \leq z \leq L$) :	condition axisymétrique $r = 0$
sur Γ_2 ($0 \leq r \leq 2.10^{-3}$ et $z = 0$) :	$T(r, t) = \bar{T}_0(t)$; $P(r, t) = \bar{P}_0(t)$
sur Γ_3 ($0 \leq r \leq 2.10^{-3}$ et $z = L$) :	$\frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = 0$; $P(r, t) = P_s = 10^5 Pa$
sur Γ_4 ($2.10^{-3} \leq r \leq 1,5.10^{-2}$ et $z = 0$) :	$T(r, t) = T_p = 473K$
sur Γ_5 ($2.10^{-3} \leq r \leq 1,5.10^{-2}$ et $z = L$) :	$T(r, t) = T_p = 473K$
sur Γ_6 ($r = 1,5.10^{-2}$ et $0 \leq z \leq L$) :	$T(z, t) = T_p = 473K$

Dans ce système d'équations la conduction axiale dans le polymère est négligeable ($Pe_z \approx 2.10^5$), de même que la force de gravité par rapport aux contraintes de cisaillement dues à la viscosité de l'écoulement ($St \approx 10^2$). Toutefois, dans la partie métallique, la conduction axiale joue un rôle important dans la thermique de la buse.

2.2.2 Paramètres physiques des matériaux

Les matériaux qui constituent le système sont : le polypropylène HV252 et un acier Inox dont leurs propriétés sont résumés dans le Tableau 1.

	C_p $\frac{J.K^{-1}.kg^{-1}}$	λ $\frac{W.m^{-1}.K^{-1}}$	ρ $kg.m^{-3}$
PP HV252	3,4656.T+1774,2	$1,071.10^{-4}.T+0,1455$	745
Acier Inox Duplex Z38	500	15	7800

Tableau 1 : Caractéristiques des matériaux utilisés pour la simulation

La rhéologie du polymère est décrite par une loi de type Cross WLF où la valeur du coefficient de piezodépendance β est issue de l'article de Kadjik [3] et où les quatre paramètres $B = 0,278 Pa.s$, $\tau = 20000 Pa$, $T_b = 4320K$, $n = 0,31$ ont été identifiés à partir de mesures de viscosité issues de [4] :

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau} \right)^{1-n}} \quad \text{avec} \quad \eta_0 = B \cdot \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \cdot \exp(\beta \cdot p) \quad (2)$$

3. Résultats numériques

Afin d'approcher les conditions de mise en œuvre dans les procédés considérés, nous avons étudié le comportement thermique de la buse dans les deux cas suivants :

- réponse à un échelon de pression et de température en entrée de canal dans le procédé d'extrusion
- réponse périodique à un cycle de pression dans le procédé d'injection

3.1 Simulation d'un échelon de pression et de température

L'augmentation de la pression d'entrée engendre un accroissement de température en amont du canal. On a corrélié cet accroissement avec l'augmentation de pression. On considère alors dans notre simulation numérique un échelon de température moyen sur la section d'entrée de la buse $\bar{T}_0(t) = 473 + \Delta\bar{T}_0(t)$ (Figure 2) et de pression $P_0(t) = 20e6 + \Delta P_0(t)$ (Figure 3), avec la corrélation $\Delta P_0(t) = \rho C \cdot \Delta\bar{T}_0(t)$. Après calculs, on relève la température aux emplacements des thermocouples.

Pour étudier la sensibilité des thermocouples à la condition d'entrée $\bar{T}_0(t)$, on doit éliminer l'influence de la source thermique due à la dissipation visqueuse engendrée par le cisaillement. En effet, si la viscosité est thermo-dépendante, la sensibilité des thermocouples à la température d'entrée peut être masquée par le terme de dissipation visqueuse. On compare donc les réponses des thermocouples ci-dessus avec celles obtenues avec un échelon de pression seul, i.e, sans variation de la température d'entrée ($\bar{T}_0(t) = 473K$), puis on fait la différence des réponses. Afin de s'affranchir de la thermo-dépendance de la viscosité, on impose donc $T = 473K$ dans son expression. Les courbes de sensibilité relatives aux 4 thermocouples pour le PP HV252 non thermo-dépendant sont représentées sur la Figure 2.

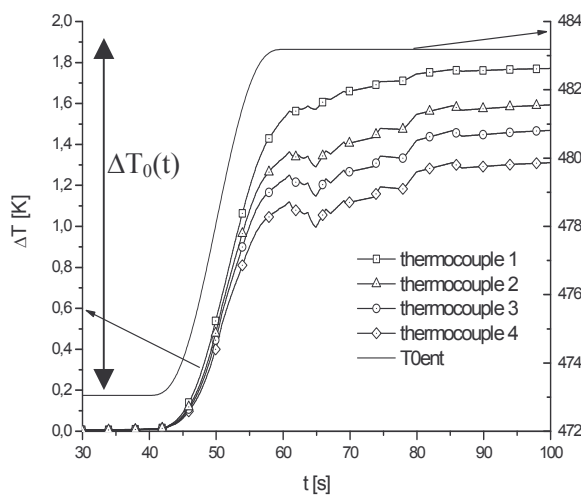


Figure 2 : Courbes de sensibilité pour le PP HV252 à $T=473 K$ et évolution temporelle de la température d'entrée du polymère $T_0(t)$

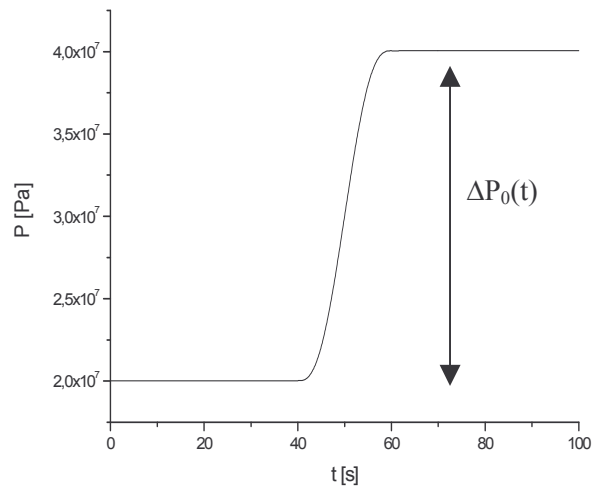


Figure 3 : Evolution de la pression en entrée du canal $P_0(t)$

On constate alors que les thermocouples voient peu l'augmentation de la température d'entrée lorsqu'elle est complètement décorrélée du terme source de dissipation visqueuse. En effet, pour une augmentation de 10K de \bar{T}_0 , les thermocouples observent une augmentation de seulement 1,7K au maximum pour le premier thermocouple, celui qui est le plus proche de l'entrée ($z=1,5cm$). Cette faible sensibilité des thermocouples est notamment due au fait que

l'écoulement atteint des vitesses assez élevées à ces fortes pressions d'injection (de l'ordre de 3m/s au centre du canal à 40Mpa). Ainsi, la chaleur n'a pas le temps de se propager à travers le métal par conduction radiale. La thermique de l'écoulement peut alors être considérée comme étant adiabatique. En effet, on peut traduire cela par le fait que l'on ait une valeur du nombre de Cameron Ca inférieure à 10^{-2} et d'après [5], cela correspond au régime adiabatique. Plus précisément, ce dernier est défini comme étant le rapport entre le terme de conduction selon l'épaisseur et le terme de convection selon la direction de l'écoulement [5] :

$$Ca = \frac{\lambda \frac{\Delta T}{R^2}}{\rho c \bar{V} \frac{\Delta T}{L}} = \frac{aL}{\bar{V}R^2} = \frac{10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^{-1}}{2 \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2} \approx 0,002 < 10^{-2}$$

avec \bar{V} , la vitesse moyenne sur une section et dans le temps du fluide, a , la diffusivité thermique moyenne dans le temps du polymère, R , le rayon interne et L la longueur du cylindre

3.2 Simulation d'un régime périodique imposé par la pression d'entrée

Dans cette partie, on se place dans le cas typique d'une injection périodique via la pression imposée comme condition d'entrée du polymère dans le canal. Cette pression est différente de celle imposée dans le cas précédent, comme l'indique la Figure 4, elle augmente jusqu'à 30Mpa. La Figure 4 montre la superposition de la pression $p(t)$ et des réponses thermiques des quatre thermocouples. La montée en pression dure 3s, ce qui est un ordre de grandeur raisonnable en mise en forme (par exemple, remplissage d'un moule). Cette montée est suivie d'un plateau de 4s qui pourrait correspondre au maintien pendant le refroidissement d'une pièce. Enfin, la partie de la courbe correspondant au retour à la pression atmosphérique (de 7 à 10s) est symétrique de la montée. La température d'entrée est constante et est égale à 473K.

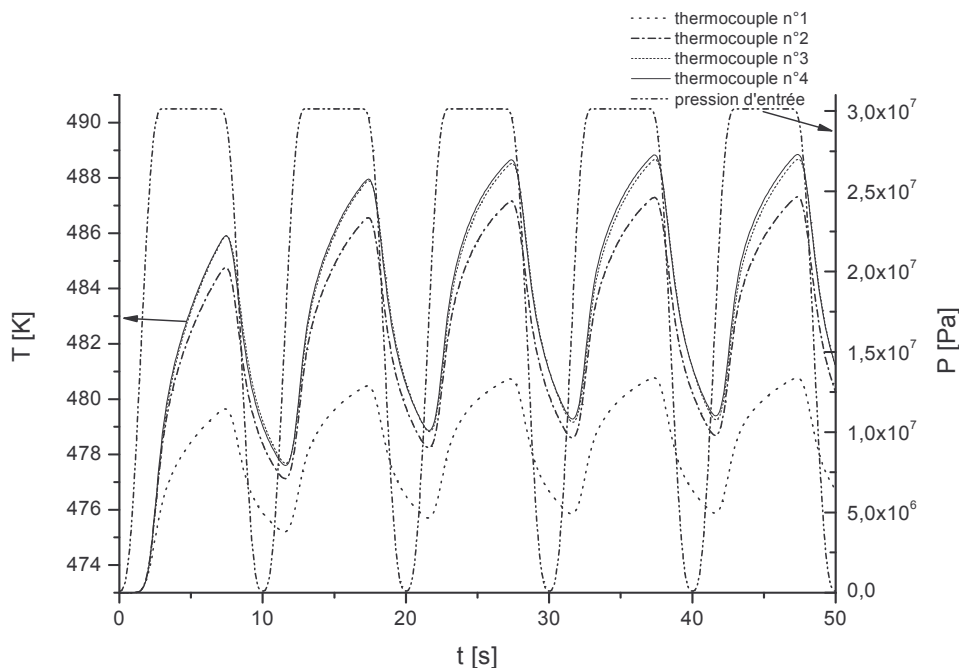


Figure 4 : Evolution temporelle de la pression d'entrée du polymère et de la température au niveau des thermocouples

On observe que le régime périodique s'établit rapidement, ce qui correspond bien à ce que l'on observe sur le procédé d'injection. Sur un cycle, la réponse des thermocouples montre

une élévation d'environ 10K, ce qui est facilement mesurable avec une bonne précision. Cet échauffement est dû aux effets de dissipation visqueuse.

Ce signal est beaucoup plus riche en informations que ceux correspondant à des régimes stationnaires comme dans [1] et [2] dans lesquels l'information spatiale seule était disponible. On peut donc prévoir que le dispositif sera très sensible à la rhéologie et que les effets d'inhomogénéité de température dans les techniques classiques de mesure joueront un rôle très important [2]. Le dispositif permettra donc de remonter au comportement réel du polymère en prenant en compte ces effets de dissipation visqueuse.

Par ailleurs, on remarque que les cycles de pression et de réponse des thermocouples ne sont pas en phase. En effet, on constate que, lors de la phase descendante du cycle de pression (retour à la pression atmosphérique), la température au niveau des thermocouples diminue mais continue à baisser alors que le cycle de pression suivant commence. Il y a donc un décalage de réponse des thermocouples dû à l'inertie thermique dans l'acier du cylindre. On peut alors supposer que si l'on prend un cycle de pression avec une phase descendante plus longue que celle proposée sur la Figure 3, alors la température au niveau des thermocouples aura le temps de se stabiliser avant le début du cycle suivant. Il faudra donc moins de cycles pour que la thermique du procédé atteigne un régime périodique établi. A l'inverse, si la phase descendante du cycle de pression est plus courte, le régime périodique établi sera atteint pour un nombre de cycles plus élevé.

4. Conclusion

Cette étude montre donc bien la faisabilité de la modélisation sous COMSOL® de ce type procédé de mise en forme des polymères. De là, on constate que le champ thermique dans la buse est faiblement sensible à la température d'entrée du polymère dans le canal en régime instationnaire. Cette sensibilité devrait permettre au moins de reconstruire l'évolution temporelle de la température d'entrée. De même, le champ thermique étant sensible à la rhéologie du polymère [2], on va pouvoir identifier les propriétés du matériau dans les conditions réelles de mise en forme. Enfin, le fait que l'on puisse atteindre un régime périodique établi, nous permettra d'effectuer l'inversion des mesures sur une période et donc de réduire l'incertitude d'estimation.

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] Kadjik SE., Vandenbrule BHAA, On the pressure dependency of the viscosity of molten polymers, Polymer engineering and science, vol.34 (20), (1994), 1535-1546.
- [4] Luyé J-F., Etude thermophysique du refroidissement du polypropylène injecté, thèse de doctorat, ENSAM Paris (1999)
- [5] 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 « PREM'S ».