

L'effet de la position du seuil d'injection sur le refroidissement d'un polymère dans un moule d'injection

Hamdy HASSAN, Nicolas REGNIER, Cédric LEBOT, Guy DEFAYE

Université Bordeaux I ; CNRS ; UMR 8508, Laboratoire TREFLE , 16 av Pey Berland, 33 607 Pessac Cedex, France.

Résumé

Le moulage par injection est l'un des processus industriels les plus exploités dans la production des pièces en plastique. La qualité de la pièce moulée par injection est fonction de la matière plastique, de la géométrie de cette pièce, de la structure du moule et des conditions du processus. La position du seuil d'injection est un enjeu d'importance dans le moulage par injection parce qu'elle affecte, de manière significative, la productivité du procédé et la qualité de la pièce finale. Pour étudier l'effet de la position du seuil d'injection sur la phase de refroidissement du polymère dans le procédé de moulage par injection, une analyse tridimensionnelle et dynamique est effectuée pour un moule avec une cavité comportant deux épaisseurs différentes. Trois positions du seuil sont proposées : normale à la surface de la cavité, normale à la petite épaisseur, et normale à la grande épaisseur de la cavité. La solution numérique du modèle physique est assurée par un code de calcul utilisant les volumes finis. Les résultats montrent que la position du seuil normale à la petite épaisseur de la cavité conduit au temps minimum requis pour la solidification de la pièce.

Nomenclature

B	constante de matériau, pa^{-1}		<i>Symboles grec</i>
C	fonction couleur	η	viscosité de cisaillement, $pa.s$
C_p	capacité calorifique, $J/kg.K$	β	constante de matériau, $pa.s$
f_s	fraction solide	ρ	la masse volumique, kg/m^3
g	gravité, m/s^2	λ	conductivité thermique, $W/m.k$
L	chaleur latente de fusion, J/kg	$\dot{\gamma}$	taux de cisaillement, s^{-1}
p	pression, pa	η_o	zéro taux de cisaillement, $pa.s$
Q_c	débit, m^3/s	Γ	région d'entrée à la cavité du moule
Sc	terme source, W/m^3	Γ_4	région d'entrée aux canaux de refroidissement,
T	température, K		
t	temps, s		<i>Indices et exposants</i>
T_b	constante de matériau, K	a	air
V	vitesse, m/s	p	polymère
L	chaleur latente de fusion, J/kg	i	entrée
		$1,2,3$	position 1,2 et 3 respectivement
		∞	ambient

1. Introduction

La demande des pièces moulées par injection augmente chaque année. Cela vient du fait que le moulage par injection est identifié comme une des techniques de fabrication les plus efficaces économiquement pour produire des pièces en plastique d'une forme complexe et précise à bas prix [1]. Il y a trois étapes significatives dans le processus de moulage : l'étape de l'injection du polymère fondu ou remplissage du moule, l'étape de refroidissement et solidification du produit et l'étape de l'éjection de la pièce. Le moule est alors refermé et un nouveau cycle d'injection peut commencer. Dans le processus de moulage par injection, la position du seuil d'injection est un paramètre de conception très important qui est en relation avec les propriétés du polymère, la forme et les dimensions de la pièce, la structure du moule et les conditions du moulage. Le choix de la position de seuil d'injection influence la façon dont les plastiques s'écoulent dans la cavité de moule. Par conséquent, ce choix a un effet important sur l'orientation de la molécule de polymère et le gauchissement de la pièce moulée par injection après refroidissement [2]. Header [3] a réalisé des expériences d'après les travaux précédents pour déterminer la position idéale du seuil d'injection et son effet sur le produit final et il a comparé le résultat avec des simulations sur ordinateur

Dans cet article, une étude tridimensionnelle est présentée sur l'effet de la position du seuil d'injection sur la solidification et la distribution de la température pendant le refroidissement du polymère (polystyrène) par le moulage par injection. La cavité de moule a la forme d'une plaque rectangulaire avec deux épaisseurs différentes. Trois positions différentes du seuil sont proposées : normale à la surface de la cavité, normale à la petite épaisseur, et normale à la grande épaisseur de la cavité (figure 1). Un code de calcul de volumes finis est utilisé pour la simulation du modèle physique.

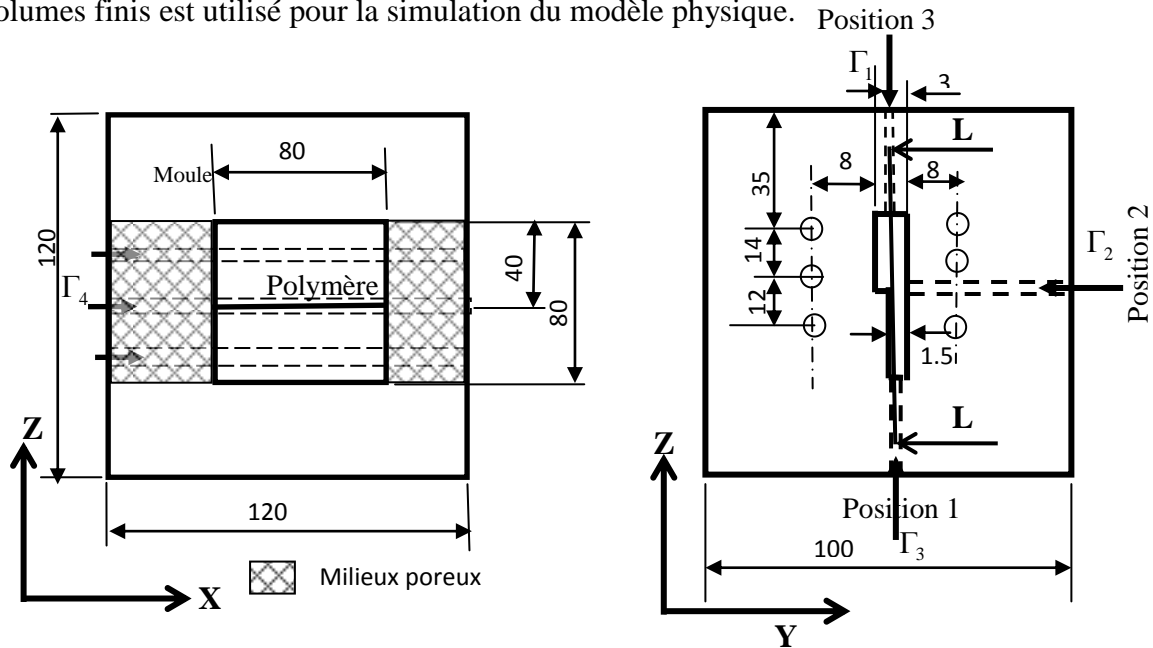


Figure 1. Le moule avec la cavité, les canaux de refroidissement et les différentes positions du seuil d'injection (Dimensions, mm).

2. Modélisation

Pendant cette étude, les propriétés physiques et thermiques (ρ , λ , C_P) du polystyrène, du moule, et de l'eau de refroidissement sont considérées constantes pendant la simulation.

Le problème considéré est celui de l'écoulement incompressible de deux fluides de caractéristiques différentes, en l'occurrence le polymère fondu et l'air. Les champs de vitesse V , de pression p , de fonction couleur C (qui représente la fraction volumique de polymère présent dans une unité de volume, et détermine donc l'interface entre l'air et le polymère pendant l'étape de remplissage) et de température T sont régis par les équations de conservation suivantes.

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial V}{\partial t} + (V \nabla) \cdot V \right] = -\nabla P + \rho g + \nabla \cdot (\tau) \quad (2)$$

$$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (V \nabla) \cdot T \right] = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \eta \dot{\gamma} + S_c \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V \cdot \nabla C = 0 \quad (4)$$

Les valeurs de la masse volumique et la viscosité varient alors suivant la phase où s'effectue le calcul selon une moyenne arithmétique [4].

$$\begin{cases} \rho = \rho_a + (\rho_p - \rho_a)C \\ \eta = \eta_a + (\eta_p - \eta_a)C \end{cases} \quad (5)$$

La fonction couleur C est égale à 1 pour le polymère et à 0 pour l'air, donc l'interface est située dans les cellules où $0 < C < 1$. L'équation de l'énergie est résolue en prenant en compte le changement d'état [5] où dans l'équation de l'énergie (3) un terme source (6), traduisant l'absorption ou le dégagement de chaleur par changement de phase.

$$S_c = \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (6)$$

Cette technique s'adapte bien aux maillages fixes et fournit une bonne précision [4]. Pour modéliser la viscosité, l'équation de Cross WLF est utilisée [6].

$$\eta = \frac{\eta_o(T, p)}{1 + \left[\eta_o(T, p) \frac{\dot{\gamma}}{\tau^*} \right]^{1-n}} \quad (7)$$

Où τ^* est le niveau de contrainte critique auquel η est dans la transition entre les limites newtoniennes et loi de puissance. Où η_o est représenté par [6].

$$\eta_o(T, p) = B \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \exp(\beta p) \quad (8)$$

Les constantes du modèle rhéologique pour le polystyrène sélectionné sont énumérées dans le tableau 1 [7].

A l'entrée de la cavité du moule.

$$V = V_i \quad \text{et} \quad T = T_i \quad \text{sur} \quad \Gamma_1, \Gamma_2 \quad \text{et} \quad \Gamma_3 \quad (9)$$

A l'entrée des canaux de refroidissement,

$$Q = Q_c \quad \text{et} \quad T = T_\infty \quad \text{sur} \quad \Gamma_4 \quad (10)$$

Sur les bords extérieurs du moule, des conditions aux limites adiabatiques sont proposées.

n	2.7×10^{-01}	τ^* (Pa)	2.484×10^{04}	B(Pa.s)	3.04×10^{-9}
T_b (K)	13300	β (1/Pa)	3.5×10^{-8}		

Table 1. Les constantes du modèle rhéologique

2.1. Résolution numérique

La résolution numérique du système d'équations gouvernant le comportement de ce système physique est réalisée par une méthode de volumes finis. Les équations sont résolues implicitement pour les différents termes dans les systèmes d'équations. La solution des équations discrétisées est résolue par un algorithme itératif de Lagrangien Augmenté [8].

3. Résultats et discussion

Une analyse tridimensionnelle complète et dépendante du temps est effectuée pour un modèle de moule avec une cavité ayant deux épaisseurs différentes comme illustré en figure 1. Le refroidissement du produit est effectué en utilisant six canaux de refroidissement. Tous les canaux de refroidissement ont la même taille et ils ont 8 millimètres de diamètre. Les paramètres de refroidissement et les propriétés matérielles sont énumérés dans les tableaux 2 et 3 respectivement [7], [9]. Ils sont considérés constants pendant toute la simulation excepté pour ce qui est décrit dans le texte.

Paramètre de l'opération		Paramètre de l'opération	
Température d'entrée de l'eau de refroidissement	30 °C	Temps de l'étape de remplissage	4,2 s
Température de fusion du polymère	110 °C	Temps de l'étape de refroidissement	37,5s
Chaleur Latente	115 kJ/kg.K	Temps d'ouverture du moule	2,2s
Température du Polymère Injecté	220 °C	Diamètre des canaux de refroidissement	8 mm
Débit total de l'eau de refroidissement	$e^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$	Température de l'air ambiant	30 °C

Table 2. Paramètre de l'opération d'injection moulage

Matériau	ρ , kg/m ³	C_p , J/kg.K	λ , W/m.K
Moule	7670	426	36,5
Polymère	938	2280	0,18
Eau de refroidissement	1000	4185	0.6
Air	1.17	1006	0.0263

Table 3. Propriétés de matériaux

Dans notre modèle numérique, chaque simulation se compose de trois étapes principales. Étape de remplissage au cours de laquelle le polymère chaud est injecté dans le moule à température et à vitesse constantes pour remplir la cavité. Étape de refroidissement où le polymère injecté est refroidi jusqu'à la fin du temps de refroidissement. L'étape

d'éjection où la cavité est ouverte et remplie d'air à la température ambiante. La cavité du moule doit être complètement remplie de polymère chaud. La viscosité du polymère étant plus grande que celle de l'air dans un facteur 10^6 , nous supposons que l'air s'échappe de la cavité du moule par une couche d'épaisseur de 1 millimètre de milieu poreux ayant les mêmes propriétés que le matériau du moule comme illustré en figure 1.

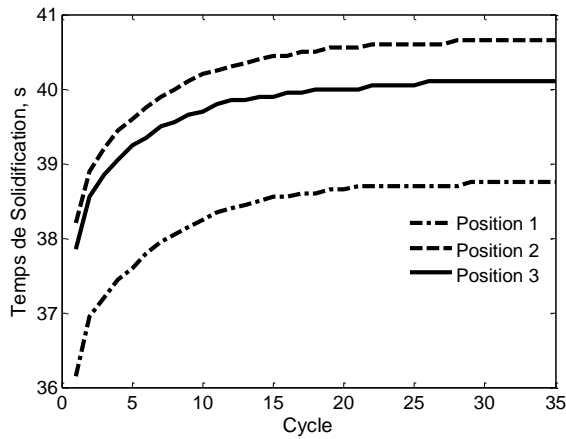


Figure 2 : La variation du temps requis pour la solidification du produit en fonction du cycle de moulage.

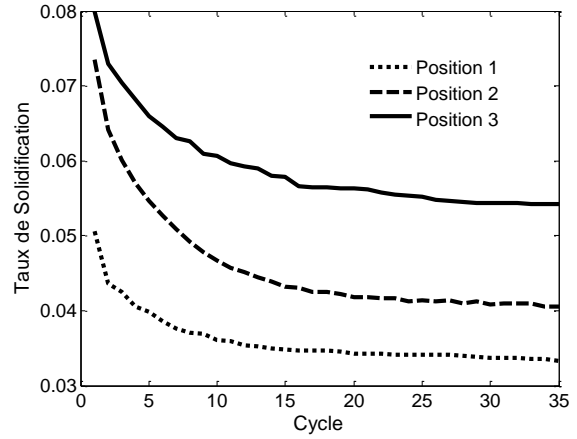


Figure 3 : Variation du taux de solidification à la fin de l'étape de remplissage en fonction du cycle de moulage.

Il est souhaitable de réduire le refroidissement et accélérer la solidification du produit pour augmenter la productivité du processus de moulage. La variation du temps requis pour solidifier complètement le produit (temps de solidification) lors de chaque cycle pour les différentes positions du seuil d'injection est illustrée en figure 2. Elle montre que la position 1 du seuil d'injection (normale à l'épaisseur minimum) donne le temps minimum requis pour la solidification. Pour assurer complètement le remplissage de la cavité de moule, nous devons éviter autant que possible la solidification du produit pendant l'étape de remplissage. La figure 3 montre que la position 1 du seuil d'injection a le taux minimum de solidification (pourcentage de solidification du polymère à la fin de l'étape de remplissage) et la position 3 a le taux maximum de solidification pendant l'étape de remplissage, pour chaque cycle de moulage par injection.

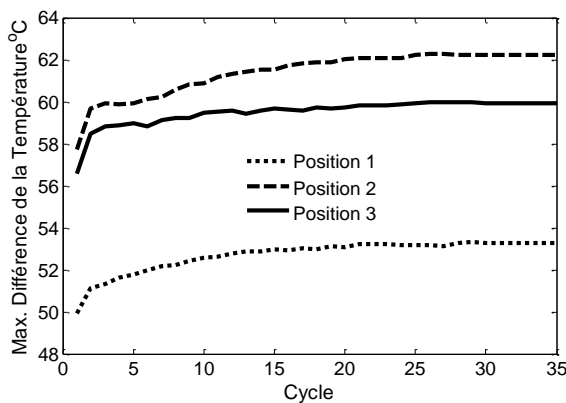


Figure 4: Changement de la différence de la température maximum à l'intérieur du produit pour chaque cycle de moulage à la fin de l'étape de refroidissement.

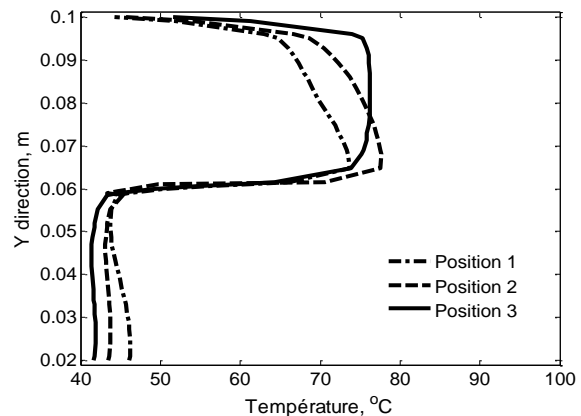


Figure 5 : changement de la température moyenne à la direction Z pour la section LL.

La forme et les propriétés finales de la pièce dépendent de la distribution de la température dans le produit quand il sort du moule. Cela signifie que le retrait du produit doit être homogène, et donc que le produit doit sortir du moule avec une distribution homogène de la température (l'écart maximum pour la température à l'intérieur du produit s'approche de zéro). La figure 4 montre que les positions 2 et 3 conduisent à une importante différence de température dans le produit. La température moyenne du produit à la fin de l'étape de refroidissement pour la section LL (figure1) parallèle à la direction Z est illustrée en figure 5. La figure 5 montre que la température moyenne de la partie épaisse et de la partie mince le long de la direction Z est constante pour la position 3 (chaque partie se contracte de façon homogène). Elle montre aussi que la position 3 a le maximum de différence de la température entre les deux parties (partie épaisse et mince) et la position 1 a le minimum de différence de la température.

Conclusion

L'effet de la position du seuil d'injection sur le refroidissement d'un Polymère dans un moule d'injection est étudié. Les résultats montrent que la position du seuil normale à la petite épaisseur de la cavité donne le temps minimum requis pour la solidification de la pièce. Elle donne aussi le taux minimum de solidification pendant l'étape de remplissage. La position 1 présente les plus grands avantages pour injecter le polymère à l'intérieur de la cavité. Avec cette analyse thermique de l'effet de la position du seuil d'injection, celle de son effet sur les propriétés mécaniques du produit final, et son effet sur la stabilité de la machine de moulage par injection, une position optimale a pu être déterminée.

References

- [1] S.H. Tang, Y.M. Kong, and S.M. Sapuan, Design and thermal analysis of plastic injection mold, *J. of Materials Processing Technology*, vol. 171 (2006) 259-267.
- [2] Xiao-Yan Huang, De-Qun Li, and Qiang Xu, Gate location optimization in injection molding based on empirical search method, *Materials science forum* vols. 575-578(2008)55-62.
- [3] Header Haddad, S.H. Masood, and B.M. Saifullah, Gate location and its effects on product quality in injection moulding, *Advanced material research*, 32(2008)181-184.
- [4] Hugues Massé, couples thermomécaniques lors de la solidification de matériaux polymères, *Thèse de doctorat, Université Bordeaux I*, (2000).
- [5] Le. Bot, Impact et Solidification de Gouttes Métalliques sur un Substrat Solide. *Thèse de doctorat, Université Bordeaux I* (2003).
- [6] H.H. Chiang, C.A. Hieber, and K.K. Wang, A unified simulation of the filling and post filling stages in injection molding. Part I: Formulation, *Polymer Engineering and Science*, **31**-2(1991) 116-124.
- [7] R. Luisa Alexandra, Viscoelastic Compressible Flow and Applications in 3D Injection Moulding Simulation, *Thèse de doctorat, L'école national superior des mines des Paris*, (2004).
- [8] S. Vincent. Modélisation d'écoulements incompressibles des fluides non miscibles. *Thèse de doctorat, Université Bordeaux I* (1999).
- [9] H. Qiao, Transient Mould Cooling Analysis Using the BEM with the Time- Dependent Fundamental Solution, *Int. Com. in Heat and Mass Transfer*, 32(2005)315-322.