

Optimisation du refroidissement d'un moule d'injection de thermoplastique

Alban AGAZZI, Vincent SOBOTKA, Laetitia PEREZ, Yvon JARNY, Didier DELAUNAY

Laboratoire de Thermocinétique de Nantes, UMR CNRS 6607,
Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes,
Rue Christian Pauc, BP 5060-44306 Nantes,
Cedex 03, France

Résumé - Dans les procédés d'injection de pièces en thermoplastique, la qualité des pièces mises en forme ainsi que le temps de cycle du procédé sont fortement conditionnés par la phase de solidification du polymère dans la cavité moulante. L'analyse des transferts de chaleur pendant cette phase, conduit à investiguer le positionnement optimal des sources froides ainsi que leurs intensités. Notre approche est basée sur un positionnement du type « conformal cooling » des canaux de refroidissement, puis sur une méthode de contrôle optimal pour déterminer les flux de chaleur à évacuer en régime périodique établi.

Nomenclature

T	Température, K	Γ	Fibre neutre, m
T_{inj}	Température d'injection, K	Ω	Surface de la pièce, m^2
T_{eject}	Température d'éjection désirée, K	t_f	Temps de cycle, s
$T_{réf}$	Température de référence, K	τ	Période de temps, s
$\nabla \delta T$	Gradient de température, K/m	λ	Conductivité thermique, $W/m.K$
$\nabla \delta T_{réf}$	Gradient de référence, K/m	ρ	Masse volumique, kg/m^3
		C_p	Chaleur spécifique, $J/kg.K$

1. Introduction

Dans le domaine de la mise en forme des thermoplastiques par le procédé d'injection, l'amélioration de la qualité des pièces injectées ainsi que la réduction des temps de fabrication sont des objectifs essentiels pour les industriels. La production cyclique d'une pièce plastique se déroule en quatre étapes : remplissage de la cavité moulante, maintien en pression, solidification et éjection. La durée consacrée à la solidification est évaluée entre 70 et 80% du temps de cycle. Une diminution même modérée de cette étape du cycle a un impact fort sur la productivité [1,2]. Le système de régulation thermique de l'outillage apparaît comme le levier essentiel pour atteindre cet objectif. Cependant, outre son efficacité thermique, il s'avère nécessaire que la conception du circuit de régulation prenne en compte les aspects qualité de la pièce. Une solidification non homogène et non équilibrée va engendrer des défauts tels que des bulles d'air, des déformations et/ou du retrait différentiel.

Barone and Caulk [3] furent les premiers, au début des années 80, à s'intéresser à l'amélioration du refroidissement, en terme de qualité finale des pièces. Le développement récent de nouveaux outils de fabrication rapide (frittage laser par exemple) permet la réalisation d'outillages avec des canaux de refroidissement de formes de plus en plus complexes. Une attention particulière est portée aux systèmes de refroidissement de type conforme ou « conformal cooling », c'est-à-dire sur un positionnement des canaux qui suit au mieux les formes de la pièce [2,4]. Comparée aux techniques conventionnelles de conception,

où ce positionnement est basé principalement sur l'expérience des concepteurs, cette approche nouvelle a démontré ses atouts : il est possible notamment de réduire le temps de mise en régime du moule, ainsi que l'étape de solidification. Cependant, en rapprochant les canaux de la cavité moulante, ils vont être affectés thermiquement de façon plus importante par la variation périodique de température. La forme de cette zone étant corrélée à celle de la pièce et la géométrie des pièces injectées étant de plus en plus complexe, une analyse rigoureuse (non empirique) des transferts de chaleur dans cette zone au sein de l'outillage est devenue indispensable.

Numériquement, cette analyse peut être réalisée dans des configurations géométriques 2-D ou 3-D, via la méthode des éléments frontières (BEM) [3,5,6] ou des éléments finis (FEM) [7-9]. Cette deuxième méthode est utilisée dans la suite de notre étude. Dans la littérature [3,5,10], la plupart du temps les problèmes d'optimisation visent à déterminer une position et un diamètre optimal par canal [8,10], et le critère à optimiser ne prend en compte que la température dans la pièce ou à la surface de la cavité moulante [3,5,10]. D'autres études s'intéressent aux débits du fluide caloporteur s'écoulant dans chaque canal, ainsi qu'à l'influence du nombre de canaux [5].

Nous avons choisi d'orienter cette étude en vue de quantifier à la fois des critères d'efficacité (temps de cycle) et de qualité de la pièce. En effet pour ne pas être endommagée par les éjecteurs, la pièce doit être suffisamment rigide à son éjection. En outre, pour éviter les déformations engendrées par les gradients thermiques au sein de la pièce [11], ceux-ci devront être réduits à l'éjection. Un critère basé conjointement sur la température et sur la norme du gradient thermique dans la pièce pendant sa solidification est donc introduit. La minimisation de ce critère s'effectuera en agissant sur la température des sources froides, et donc des fluides dans chaque canal.

2. Position des canaux

Considérons la pièce de géométrie cylindrique, figure 1. Du point de vue thermique, le caractère cyclique du procédé d'injection se traduit par la durée de mise en régime périodique établi du moule. La distance entre canal de refroidissement et paroi de la cavité moulante conditionne cette durée, ainsi que l'amplitude des oscillations. En diminuant cette distance, l'inertie thermique du moule et donc cette durée d'établissement sont réduits, contrairement à l'amplitude des oscillations qui augmente (figure 2)

La thermique du moule n'étant généralement pas une priorité pour les moulistes, les techniques conventionnelles consistent à concevoir des canaux de formes simples (circulaires), placés de façon empirique. La figure 3 montre que cette stratégie de refroidissement entraîne un profil de température non uniforme au bord de la pièce, c'est-à-dire des zones qui solidifient à des vitesses différentes. Par souci de clarté, la distribution spatiale de température n'est représentée que sur le segment AB à l'instant d'éjection, car il caractérise au mieux les limites d'un refroidissement classique.

En positionnant les canaux suivant une approche « conformal cooling », c'est-à-dire qui suivent au mieux les formes de la pièce nous constatons clairement, figure 3, que le refroidissement est plus rapide. En effet, pour le même temps de cycle, la température atteinte à l'éjection est plus faible et le profil de température obtenu sur le segment AB devient plus uniforme.

La figure 2 montre que la température du moule au point A, atteint un régime périodique établi thermiquement, après 10 cycles avec des canaux disposés de façon conventionnelle, et seulement après 2 cycles avec une disposition « conformal cooling ». D'autre part, on observe

que l'amplitude des oscillations, au même point A, est moins importante dans la configuration conventionnelle.

3. Optimisation de la température des sources froides

Les résultats précédents justifient le choix de la configuration du type « conformal cooling » pour positionner les canaux au plus près de la paroi moulante. Pour éviter les défauts de gauchissement et les défauts dus au retrait différentiel à l'éjection, nous cherchons toutefois à refroidir la pièce de façon uniforme et à limiter les gradients thermiques. La géométrie de la pièce n'étant pas uniforme, nous admettons disposer de nc circuits de refroidissement indépendants dont les positions sont fixées et nous cherchons à déterminer la température de fluide dans chaque canal. La discussion sur la position optimale des canaux n'est pas abordée dans cette étude, il faudrait en effet analyser le système de régulation thermique dans son ensemble (puissance maximale à évacuer, dimensionnement de l'échangeur...)

Pour formuler le problème d'optimisation, le temps de cycle t_f est supposé fixé, et on note $T(x,t;T_\infty)$ la température en régime périodique établi, en tout point de la pièce, à chaque instant pendant la durée du cycle, calculée avec $T_\infty = [T_\infty^j, j=1..,nc]$ le vecteur températures des fluides (supposées constantes). Nous introduisons alors le critère suivant :

$$J_\mu(T_\infty) = \mu \int_{t_f-\tau}^{t_f} \frac{1}{\Gamma} \int_{\Gamma} \left(\frac{T - T_{ejec}}{\delta T_{ref}} \right)^2 .d\Gamma .dt + (1 - \mu) \int_{t_f-\tau}^{t_f} \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \left(\frac{\nabla T}{\nabla \delta T_{ref}} \right)^2 .d\Omega .dt \quad (1)$$

- Le premier terme intègre les variations de température de la pièce le long de sa fibre neutre (Γ), sur l'intervalle $[t_f - \tau, t_f]$ qui précède l'instant d'éjection. τ est un paramètre temporel qui permet de limiter la période de calcul du critère en fin de solidification.
- Le second terme intègre la norme (au carré) du gradient thermique dans tout le volume Ω de la pièce, sur le même intervalle de temps.
- Le paramètre $\mu \in [0,1]$ permet de pondérer les deux termes.
- Pour normaliser les deux termes, on introduit l'intervalle de température $\delta T_{ref} = T_{inj} - T_{ejec}$, écart entre la température d'injection et celle d'éjection, et le gradient moyen associé $\nabla \delta T_{ref} = \delta T_{ref} / e$ obtenu en considérant cet écart sur l'épaisseur moyenne e de la pièce.

La prise en compte simultanée de deux termes dans le critère à optimiser illustre la dualité du problème qualité/productivité, le premier terme étant lié à la productivité, le second à la qualité.

La minimisation du critère peut s'effectuer en utilisant l'algorithme du gradient conjugué, les composantes du gradient étant déterminées en utilisant la technique de la variable adjointe [12].

4. Résultats

Les résultats présentés ont été obtenus en considérant la solidification d'un polymère thermoplastique injecté à $T_{inj}=220^\circ C$ et que l'on cherche à éjecter à $T_{ejec}=80^\circ C$ avec un cycle d'une durée de $t_f=20s$.

Dans une première approche, on a supposé $nc = 1$, la même température T_∞^1 est imposée dans tous les canaux. Observons, figures 4 et 5, la variation du critère $J_\mu(T_\infty^1)$ pour une température de refroidissement T_∞^1 variant de 20°C à 200°C et $\mu \in [0,1]$. Les valeurs optimales de T_∞^1 qui minimisent le critère pour $\mu=0$ (critère basé uniquement sur la température) et pour $\mu=1$ (critère basé uniquement sur le gradient) sont différentes. Entre ces deux cas extrêmes, les iso-valeurs du critère se développent autour d'un point-selle voisin de $(T_\infty^1 = 110^\circ\text{C}, \mu = 0.5)$ qui réalise le meilleur compromis au sens du critère choisi.

L'analyse du refroidissement avec $nc=1$ montre la présence de zones moins refroidies à la fin du cycle du fait d'une plus grande épaisseur (point A sur la figure 2). Pour améliorer cette situation, on choisit $nc=2$. La figure 6 est obtenue en choisissant la partie du critère basée uniquement sur la température ($\mu = 1$). La valeur optimale de $J_\mu(T_\infty^1, T_\infty^2) = 0.407$ est obtenue pour le couple $(T_\infty^1, T_\infty^2) = (70^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C})$. Cette valeur est inférieure à celle obtenue avec $nc=1$: $J_\mu(T_\infty = 50^\circ\text{C}) = 0.640$ (figure 4). Ce résultat illustre l'intérêt d'utiliser des canaux indépendants à différentes températures.

5. Conclusion

Les résultats obtenus démontrent l'intérêt d'une configuration de type « conformal cooling » pour le refroidissement d'une pièce, par rapport à une configuration conventionnelle.

Un critère prenant en compte à la fois les températures et les gradients thermiques dans la pièce a été introduit pour quantifier l'efficacité du procédé ainsi que la qualité des pièces injectées. La minimisation de ce critère s'effectue en déterminant la température des sources froides, et donc des fluides dans chaque canal, pour une configuration et un temps de cycle donné.

Les résultats présentés illustrent l'intérêt de considérer des canaux indépendants à différentes températures. Par ailleurs cette méthodologie permet d'envisager l'utilisation d'un nombre plus importants de circuits indépendants ($nc > 2$), pour abaisser encore le même critère.

Références

- [1] Z.C. Lin, M.H. Choi, Design of the cooling channels in non rectangular plastic flat injection mold, *Journal of manufacturing systems*, Vol. 21 n°3, pp.167-186 (2002)
- [2] D.Dimitrov, A. Moammer, Investigation towards the impact of conformal cooling on the performance of injection moulds for the packaging industry, *Polymer engineering and science*, pp.67-74.
- [3] M.R. Barone, D.A. Caulk, Optimal arrangement of holes in a two dimensional heat conductor by a special boundary integral method, *International for numerical methods in engineering*, Vol.18, pp.675-685,(1982)
- [4] Xu, Sachs, Allen, The design of conformal cooling channels in injection molding tolling, *Polymer engineering and science*, Vol. 41, n°7, pp.1265-1279,(2001)

- [5] T. Matsumoto, M. Tanaka, Optimum design of cooling lines in injection moulds by using boundary element design sensitivity analysis, *Finite Elements in Analysis and Design* , Vol.14, pp.177-185,(1993).
- [6] N. Pirc, F. Bugarin, F.M. Schmidt, M. Mongeau, 3d BEM-based cooling-channel shape optimization for injection moulding process,
<http://www.math.univtoulouse.fr/~mongeau/EngOpti.pdf>
- [7] Tang, Pochiraju, Chassapis, Manoochchri, Three-dimensional transient mold cooling analysis based on Galerkin finite element formulation with a matrix-free conjugate gradient technique, *International journal for numerical methods in engineering*, Vol. 39, pp.3049-3064 (1996)
- [8] Li Q. Tang,C. Chassapis, S.Manoochchri, Optimal cooling system design for multi-cavity injection molding, *Finite elements in analysis and design*, 26, pp.229-251, (1997)
- [9] L.Q. Tang, K. Pochiraju, C. Chassapis, S. Manoochchri, A computer-aided optimization approach for the design of injection mold cooling systems, *Journal of mechanical design*,Vol.120, pp.165-174, (1998)
- [10] H. Qiao, A systematic computer-aided approach to cooling system optimal design in plastic injection molding, *International Journal of Mechanical Sciences*, 48 , pp.430-439, (2006)
- [11] H.H. Chiang, K. Himasekhar, N. Santhanam and K.K. Wang, Integrated simulation of fluid flow and heat transfer in injection molding for the prediction of shrinkage and warpage, *J. Eng. Mater. Tech.*, Vol.115, pp.37-47, (1993)
- [12] Y. Jarny, The Adjoint Method to compute the Numerical Solutions of Inverse Problems, *Inverse Engineering Handbook*, Woodbury K.A., editor CRC press LLC ISBN 0-8493-0861-5,(2003)

Remerciements

Cette étude a été réalisée conjointement avec le Pôle Européen de Plasturgie dans le cadre du projet OSOTO, labélisé par le Pôle de Compétitivité Plastipolis de la Région Rhône Alpes.

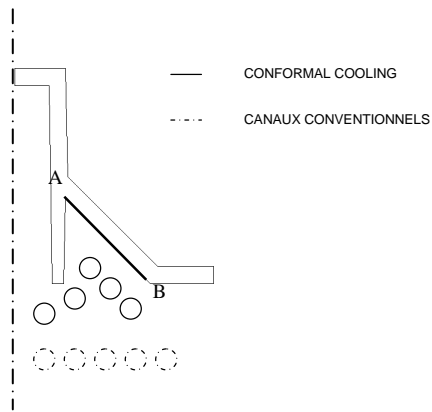


Figure 1 : Coupe axisymétrique de la pièce étudiée dans les deux configurations de refroidissement

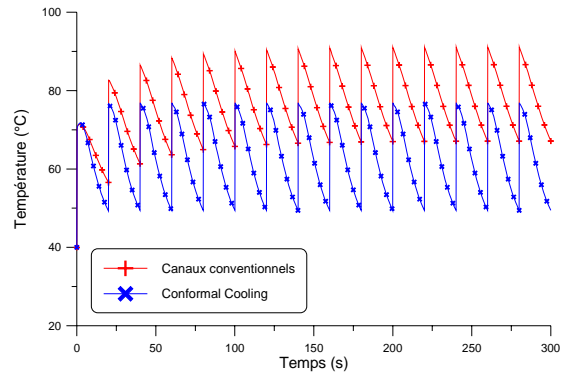


Figure 2 : Influence de la position des canaux sur la mise en régime périodique établi – Comparaison de la configuration conventionnelle et du conformal cooling

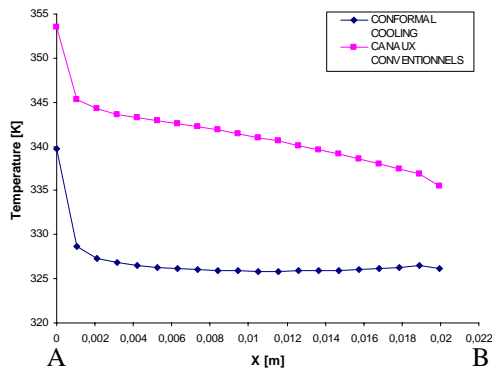


Figure 3 : Profil de température surfacique du moule à l'instant d'éjection sur le segment [AB] - Comparaison de la configuration conventionnelle et du conformal cooling

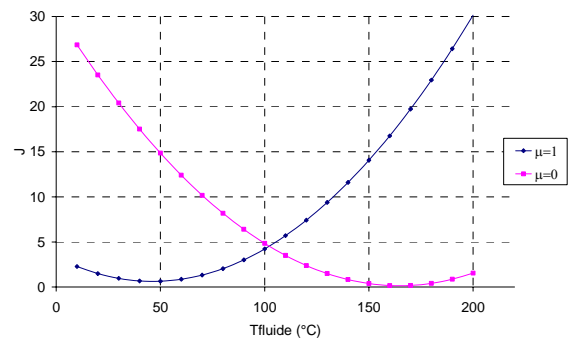


Figure 4 : Evolution du critère J dans le cas $nc=1$

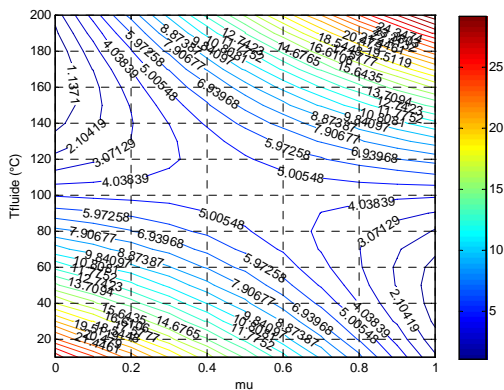


Figure 5 : Iso-valeurs du critère J dans le cas $nc=1$

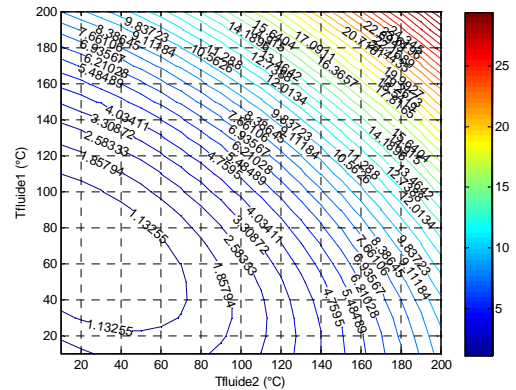


Figure 6 : Iso-valeurs du critère J dans le cas $nc=2$ et $\mu=1$