

L'Effet de la Position des Canaux de Refroidissement sur le Degré de Solidification d'un Polymère dans un Moule d'Injection

HASSAN Hamdy, REGNIER Nicolas, PUJOS Cyril, LE BOT Cedric, DEFAYE Guy

Université Bordeaux I; CNRS ; UMR 8508,
Laboratoire TREFLE ,
16 av Pey Berland, 33 607 Pessac
hassan@enscpb.fr

Résumé :

La conception du système de refroidissement est un enjeu d'importance dans l'industrie plastique parce qu'elle affecte, de manière significative, la productivité du procédé et la qualité de la pièce finale. L'objectif de cette étude est de mettre en évidence les effets de la position des canaux de refroidissement sur la solidification d'un polymère fondu lors de l'étape de refroidissement d'un procédé de moulage. Le cas numérique étudié est le moulage d'une pièce en forme de T. La résolution numérique de l'équation de l'énergie en régime transitoire est assurée par un code de calcul utilisant les volumes finis. L'étude permet de quantifier l'impact de la position des canaux de refroidissement sur l'homogénéisation de la solidification du polymère et sur la progression du processus de la solidification.

Abstract :

Cooling system design is of great importance for plastic products industry by injection molding because it significantly affects the productivity and quality of the final product. The objective of this study is to show the effects of the cooling channels position on the solidification of the melted polymer during the cooling stage of the molding process. A numerical case is studied for mould having plastic part with T form. A transient numerical solution for the energy equation using a finite volume approach is carried out. The study aims to quantify the effect of the cooling channels position on the homogeneity of the solidification polymer and the progress of the solidification process.

Mots-clefs : solidification ; moulage ; refroidissement

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 précise et complexe. Lors de la phase de refroidissement, les canaux de refroidissement évacuent la chaleur apportée par la matière injectée lors de la phase de remplissage. Cette chaleur transportée par conduction au travers des parois du moule, est évacuée par convection au sein du fluide qui s'écoule dans les canaux. Par conséquent, une conception efficace des canaux de refroidissement peut réduire le temps de refroidissement, et augmenter la productivité. D'autre part, une contrainte résiduelle thermique voire un gauchissement dans le produit final peuvent résulter d'un refroidissement non uniforme. Ceux-ci peuvent affecter de manière significative la qualité de produit, particulièrement en termes d'aspect et de précision. Des travaux sur le même sujet ont déjà été réalisés par Tang *et al.* (1997) et Qiao (2004). Le but de cet article est d'étudier l'effet de la position des canaux de refroidissement sur la distribution du degré de solidification dans le polymère. Une analyse du refroidissement du moule est réalisée en utilisant la méthode

des volumes finis pour une pièce en plastique en forme de T avec les mêmes dimensions que Qiao (2004) (FIG.1). En raison de la symétrie, seule la moitié du moule est modélisée et analysée, comme le montre la FIG.2. Différentes positions des canaux de refroidissement sont testées (la nomenclature des différentes positions est illustrée en FIG.2).

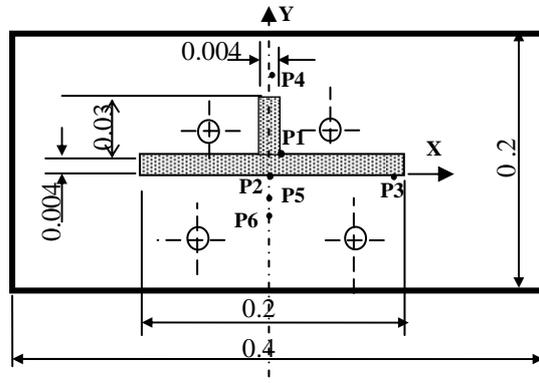


FIG.1 Représentation du moule et de la pièce avec les canaux de refroidissement. (Dimensions en m).

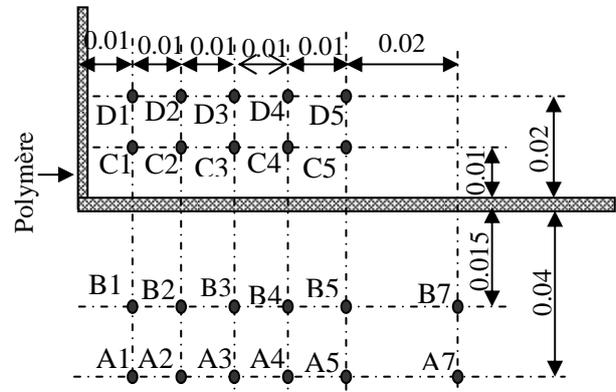


FIG.2 Les différentes positions de canaux de refroidissement. (Dimensions en m)

2 Modélisation

Le refroidissement s'effectue par le transport de la chaleur via la convection forcée au sein du liquide réfrigérant s'écoulant dans les canaux de refroidissement, ainsi que par la convection naturelle de l'air autour du moule. Le liquide réfrigérant traverse les canaux à un débit donné et à une température donnée qui sont considérés constants dans toute la longueur du canal. Dans ce travail, on considère un modèle bidimensionnel dépendant du temps. Le modèle décrit la cavité et le moule l'entourant, incluant les canaux de refroidissement. On suppose un contact thermique parfait entre les parois du moule et le polymère (résistance thermique nulle). L'équation de l'énergie est résolue en prenant en compte le changement d'état, afin d'obtenir l'évolution temporelle de la distribution de température au sein du moule et du polymère. Il existe diverses méthodes pour déterminer le champ thermique d'un milieu avec changement de phase. Pour notre part, nous introduisons dans l'équation de l'énergie (1) un terme source (2), traduisant l'absorption ou le dégagement de chaleur par changement de phase. Cette technique s'adapte bien aux maillages fixes et fournit une bonne précision selon O. Bertrand (1999).

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_c \quad (1)$$

$$\text{Avec } S_c = \rho L_f \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (2)$$

Où S_c est le terme source (W/m^3), ρ est la masse volumique (kg/m^3), C_p est la capacité calorifique massique à pression constante (J/kg.K), T est la température (K), t est le temps (s), λ est la conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), f_s la fraction solide en fonction de la température et L_f la chaleur latente de fusion (J/kg).

Les conditions limites sont décrites par les équations (3) et (4).

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_c (T - T_c) \quad \text{en } \Gamma_1 \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_a (T - T_a) \quad \text{en } \Gamma_2 \quad (4)$$

Où n est la direction normale, Γ_1 et Γ_2 sont respectivement la surface des canaux de refroidissement et la surface extérieure du moule, h_c représente le coefficient de transfert de chaleur entre le moule et le fluide de refroidissement à température T_c , h_a est le coefficient du transfert de chaleur entre le moule et l'air ambiant à température T_a , considérée constante sur toute la surface extérieure de moule. Les propriétés des matériaux, et les paramètres opératoires pour le refroidissement sont énumérés respectivement dans les tableaux 1 et 2. Ils sont considérés constants pour tous les résultats numériques.

Table 1. Propriétés de matériaux

Matériau	Masse volumique kg/m ³	Chaleur spécifique J/kg.K	Conductivité W/m.K
Moule	7670	426	36.5
Polymère	938	1800	0.25
Air	1.17	1006	0.0263

Table 2. Paramètres opératoires pour le refroidissement

T_c	30 °C	T_a	30 °C
h_c	3650 W/m ² .K	h_a	77 W/m ² .K
Température de Polymère Injecté	220 °C	Température de fusion du polymère	110 °C
Chaleur Latente L_f	115 kJ/kg.K	Temps d'ouverture du moule	4 s

3 Résolution Numérique

La résolution numérique du système d'équations gouvernant le comportement de ce système physique est réalisé par une méthode de volumes finis. Les équations sont résolues implicitement. La prise en compte du changement de phase dans l'équation de l'énergie est résolue par un algorithme de type point fixe sur la fraction solide. On suppose la variation de l'enthalpie linéaire en fonction de la température. A chaque itération de ce point fixe, on utilise une discrétisation temporelle hybride explicite/implicite déjà validée dans des études précédentes Le Bot (2003). La technique utilisée correspond à la méthode proposée par Vincent *et al* (1990), basée sur la technique « New Source » de Voller (1990). Cette méthode repose sur un algorithme itératif de type point fixe sur la température où le nœud qui change de phase est ramené et maintenu à la température de changement de phase T_f grâce au terme source. Ce calcul est réitéré jusqu'à la convergence de la température avec un terme source dépendant de la chaleur latente. Le terme source S_c est discrétisé selon l'équation (5).

$$S_c = \rho L_f \frac{\partial f_s}{\partial t} \approx \rho L_f \frac{f_s^{K+1} - f_s^K}{\Delta t} \quad (5)$$

Où K représente les itérations internes.

4 Résultats et Discussion

Une analyse du refroidissement du moule plein est effectuée pour un modèle de moule plat en forme de T et quatre canaux de refroidissement circulaires. Tous les canaux de refroidissement ont un diamètre de 10 mm. L'évolution de la température du moule pendant un temps de refroidissement de 16 s est observée en différentes localisations: les points P1 à P3

(FIG. 1) situés à l'interface moule – polymère et les points P4 à P6 situés à l'intérieur du moule (FIG. 1). Les 40 premiers cycles sont simulés pour des canaux de refroidissement circulaires en positions A5 et D3 (FIG.2). La FIG. 3 montre l'évolution de la température en fonction du temps pour chacun des points P1 à P6. Les résultats de la simulation sont en bon accord avec la caractéristique transitoire des variations cycliques de la température de moule décrites par Qiao (2004). La fluctuation, relativement petite de la température, est plus grande pour les points proches de la cavité. En comparant avec Qiao (2004), on voit que la température du moule a augmenté lorsqu'on tient compte de la solidification. Dans ce cas ; l'amplitude maximale de la fluctuation de température pendant le cycle peut atteindre 12°C.

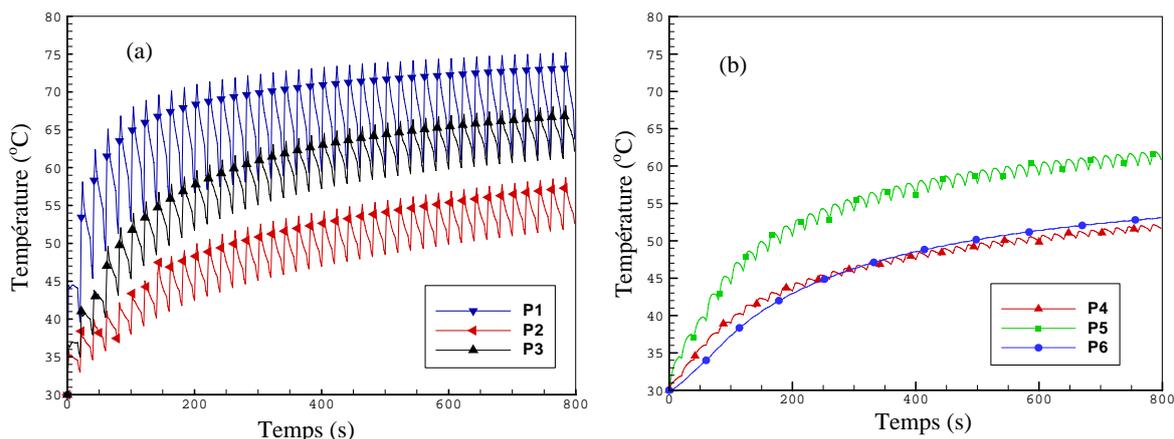


FIG. 3. Evolution de la température des 40 premiers cycles avec le temps aux positions (a) P1 à P3, et (b) P4 à P6.

4.1 L'effet de la position

Un système de refroidissement efficace fournissant une distribution uniforme de la température dans tout le polymère pendant le processus de refroidissement devrait assurer la qualité du produit en empêchant le rétrécissement différentiel et les contraintes internes. En même temps, il devrait réduire la période du refroidissement et accélérer la solidification du produit pour augmenter la productivité du processus de moulage. Pour étudier l'effet de la position des canaux de refroidissement, nous avons considéré différentes positions des canaux de refroidissement comme illustré en FIG. 2. Nous avons divisé les positions proposées en quatre groupes : les groupes A et B réfèrent à différentes positions du canal inférieur de refroidissement pour une position fixe du canal supérieur de refroidissement, et *vice versa* pour le groupe C et D.

La FIG. 4 représente l'effet de différentes positions du canal de refroidissement sur le taux de solidification (calculé numériquement comme sommation de la fraction solide de chaque élément multiplié par la surface de cet élément rapportée à la surface totale du polymère) à la fin du 25^{ème} cycle de refroidissement pour le groupe A et B avec le temps. Elle indique que le taux de refroidissement augmente et par conséquent le taux de solidification du polymère augmente lorsque le canal de refroidissement s'approche du polymère dans la direction Y. Concernant sa position dans la direction X, le refroidissement le plus efficace est obtenu lorsque que le canal de refroidissement se trouve à une abscisse située entre 20% et 50% de la longueur de la cavité comme le montre la FIG. 4b.

Pour étudier l'effet de la position du canal de refroidissement supérieur sur le processus de refroidissement du produit, on considère deux positions dans la direction de Y (C, D) et quatre positions dans la direction de X (FIG. 2) pour les mêmes conditions de fonctionnement que dans

le cas précédent. Quand on compare le pourcentage de solidification pour différentes positions du canal supérieur (C et D) (FIG. 5), on trouve que le temps de refroidissement diminue lorsque l'ordonnée du canal de refroidissement supérieur diminue. Concernant sa position X, le refroidissement est le plus efficace lorsque l'abscisse tend vers 0.

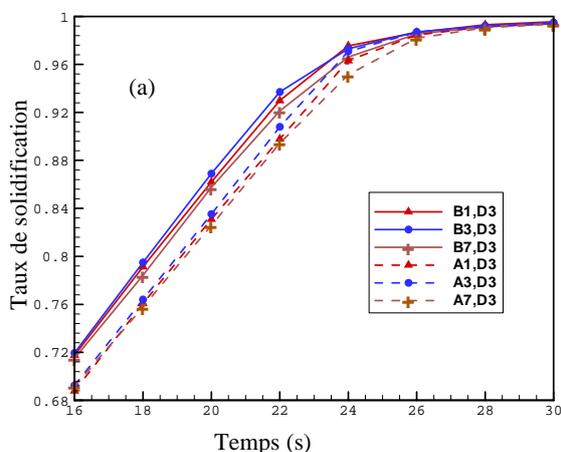


FIG. 4a. Evolution du taux de solidification de polymère avec le temps de refroidissement pour différentes positions des canaux de refroidissement.

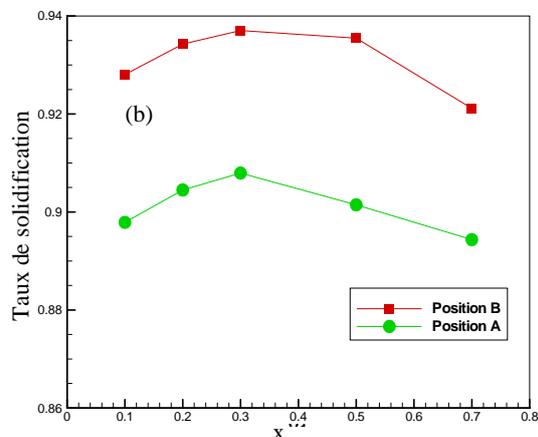


FIG. 4b. Taux de solidification en fonction de l'abscisse des canaux de refroidissement inférieurs pour 2 ordonnées (A et B, cf FIG.2) pour un temps de refroidissement de 22 s.

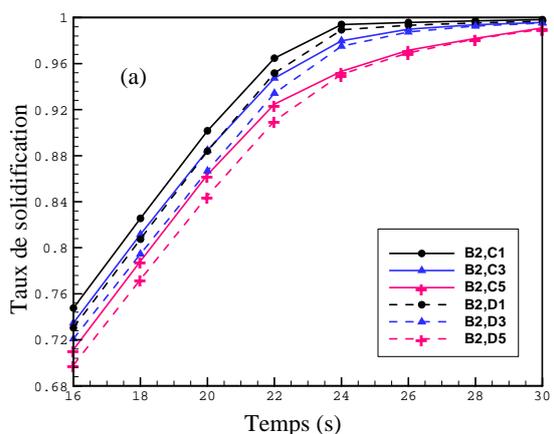


FIG. 5a. Evolution du taux de solidification de polymère avec le temps de refroidissement pour différentes positions des canaux de refroidissement.

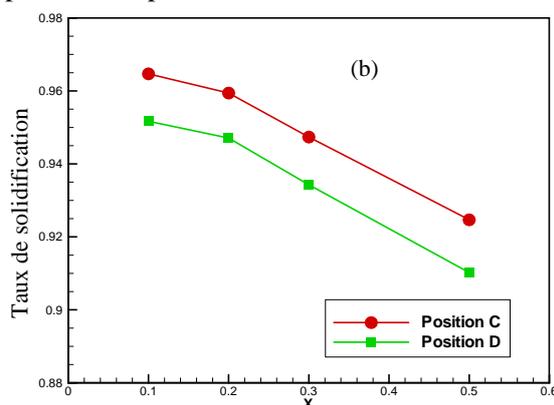


FIG. 5b. Taux de solidification en fonction de l'abscisse des canaux de refroidissement inférieurs pour 2 ordonnées (C et D, cf FIG.2) pour un temps de refroidissement de 22 s.

La distribution du degré de solidification dans le polymère à la fin de l'étape de refroidissement est représentée dans la FIG. 6 pour différentes positions du canal de refroidissement. On constate sur les FIG.4 et 5 que le temps de solidification totale du polymère ne dépend pas de la position des canaux de refroidissement (dans la gamme de positions testée). Cependant sur la FIG. 6, on constate que la position des canaux de refroidissement impacte sur l'homogénéité du degré de solidification : l'homogénéité du degré de solidification augmente avec l'abscisse du canal de refroidissement. L'apparition des deux régions dans la distribution de la solidification de la FIG. 6 mène à la présence d'une contrainte résiduelle thermique et

potentiellement à un grave gauchissement dans le produit final. Les FIG. 4, 5 et 6 montrent que la position du canal de refroidissement supérieur a une plus grande influence que celle du canal inférieur, ce qui est certainement lié à la géométrie en forme de T inversé de l'empreinte.

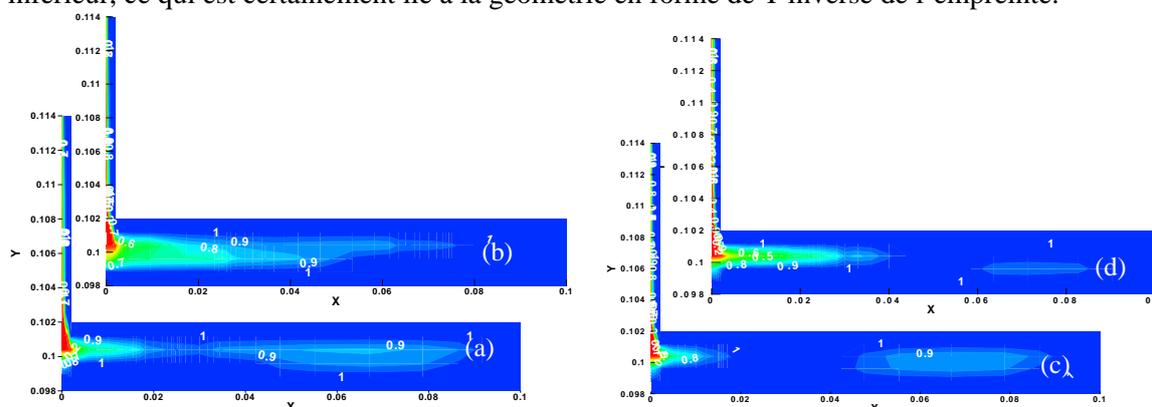


FIG.6. La distribution du degré de solidification dans le polymère pour différentes positions des canaux de refroidissement (a) B2, D3 (b) B7, D3, (c) B2, C3, et (d) B2, C5.

5 Conclusions

La variation de la température du moule pendant un certain nombre de cycles d'injection-moulage est calculée. L'effet de la position des canaux de refroidissement sur le degré de solidification de polymère est étudié. La position des canaux de refroidissement a un grand effet sur le procédé de refroidissement et le degré de solidification dans le polymère. Les résultats prouvent que la disposition du système de refroidissement qui donne le temps de refroidissement minimum ne donne pas nécessairement la distribution de degré de solidification optimale dans tout le produit. La disposition du système doit être optimisée pour réaliser les deux buts.

Références

- H. Qiao, 2004, Transient Mold Cooling Analysis Using the BEM with the Time- Dependent Fundamental Solution, Int. Com. in Heat and Mass Transfer, vol. 32, P. 315-322.
- Le Bot, 2003, Impact et Solidification de Gouttes Métalliques sur un Substrat Solide. *Thèse de doctorat*, Université Bordeaux I.
- Li Q. Tang, C. Chassapis, S. Manoochchri, 1997, Optimum Cooling System Design for Multi-Cavity injection Molding, Finite Elements in Analysis and Design vol.26. P.229-251.
- O. Bertrand, 1999, Phénomènes de ségrégation et contraintes thermomécaniques associés au processus de changement de phase liquide - solide. *Thèse de doctorat*, Université Bordeaux I.
- S. Vincent, E. Arquies, 1990, Numerical Modelling of Cooling and Solidification of Molten Particles Impacting a Solid Substrate, Eurotherm.
- V.R. Voller, 1990, Fast Implicit Difference Method for the Analysis of Phase Change Problems, *Numerical Heat Transfer*, vol. 17, part B, P 155-169.