



**HAL**  
open science

## Comparaison du comportement thermique des moules d'injection plastique obtenus par stratoconception selon la technique d'assemblage

Eliette Mathey, Luc Penazzi, Fabrice Schmidt, François Ronde Oustau

### ► To cite this version:

Eliette Mathey, Luc Penazzi, Fabrice Schmidt, François Ronde Oustau. Comparaison du comportement thermique des moules d'injection plastique obtenus par stratoconception selon la technique d'assemblage. Colloque national MECAMAT, Jan 2003, Aussois, France. 4 p. hal-01798913

**HAL Id: hal-01798913**

**<https://hal.science/hal-01798913>**

Submitted on 9 Aug 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# COMPARAISON DU COMPORTEMENT THERMIQUE DES MOULES D'INJECTION PLASTIQUE OBTENUS PAR STRATOCONCEPTION SELON LA TECHNIQUE D'ASSEMBLAGE

E. Mathey, L. Penazzi, F. Schmidt, F. Rondé-Oustau

CROMeP, Ecole des Mines d'Albi

Campus Jarlard, Route de Teillet, 81013 ALBI Cedex 09

Téléphone : 05 63 49 30 83, Télécopie : 05 63 49 32 42

Adresse(s) électronique(s) : mathey@enstimac.fr, penazzi@enstimac.fr, schmidt@enstimac.fr,

ronde@enstimac.fr

**Mots clés** : injection de thermoplastiques, moule, refroidissement, simulation numérique, Stratoconception

## 1 INTRODUCTION

Dans une optique de réduction des coûts et des délais de fabrication des outillages, plusieurs procédés de prototypage rapide ont été appliqués à leur fabrication, notamment en plasturgie. Un de ces procédés, la stratoconception, est basée sur la construction de pièces par empilement de plaques préalablement usinées et assemblées par collage ou brasage. Ce procédé a déjà été appliqué avec succès à la fabrication de moule de mousage (Gley, 2001) et d'extrusion-soufflage (Pelaingre, 2001) et des études visent aujourd'hui à l'appliquer à la fabrication de moules d'injection (Bryden, 2001). Ce procédé offre une grande liberté dans le choix des géométries et permet entre autres d'envisager de créer des canaux de refroidissement ou chauffage de sections variées, suivant la surface des pièces et ainsi d'améliorer la fonction d'échangeur de chaleur des moules d'injection.

Les méthodes actuelles de conception de la régulation thermique des moules d'injection sont variées : expérience des moulistes, calculs analytiques (par exemple Menges, 1994 et Xu, 1998) ou numériques à l'aide de logiciels dédiés à l'injection comme Moldflow<sup>TM</sup>). Ces méthodes sont limitées pour dimensionner et optimiser le système de régulation dans le cas de géométrie complexes (canaux non rectilignes ou échangeur de chaleur) et pour prendre en compte le comportement de matériaux de moules non massifs.

L'étude numérique suivante vise à montrer l'intérêt d'une modification de la géométrie du système de refroidissement (qui est possible dans le cas d'un outillage rapide) et à montrer l'influence de la stratification du moule sur les transferts thermiques intervenant lors du refroidissement. Pour estimer ces différentes influences, l'exemple d'un moule simple (disque) est considéré. Les échanges thermiques sont estimés selon les modèles développés ci-dessous grâce à un calcul par éléments finis en 2D axi-symétrique avec le logiciel ABAQUS<sup>TM</sup>.

## 2 INFLUENCE DE LA GÉOMÉTRIE D'UN MOULE MASSIF

### 2.1 Modèle de calcul

Un calcul stationnaire sur le moule permet d'évaluer sa capacité à évacuer le flux de chaleur qui est apporté par le polymère pendant le refroidissement. Les tendances observées sur le calcul stationnaire seront ensuite complétées par un calcul du refroidissement de la pièce dans le moule (paragraphe 4). Les phases d'injection et de compactage sont de courte durée devant la phase de refroidissement et ne sont pas prises en compte : le flux imposé à la surface du moule est donc uniforme sur la surface. En considérant la conductivité du moule constante avec la température, l'équation de la chaleur en régime permanent s'écrit :  $\forall M \in \Omega_M, \Delta T = 0$ .

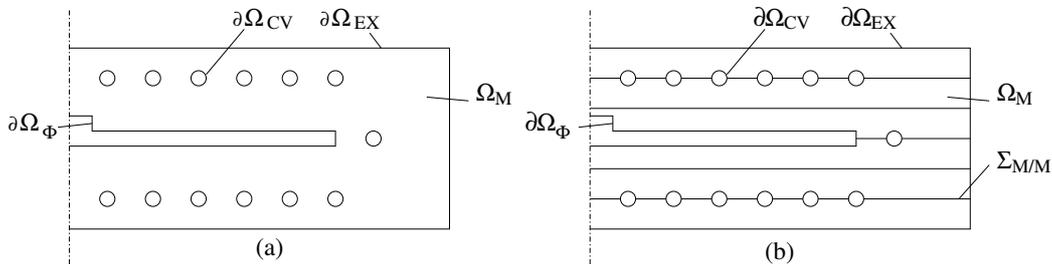


FIG. 1 – Domaines de calcul stationnaire sur le moule massif (a) et sur le moule stratifié (b)

Les conditions aux limites (Figure 1) du problème sont donc :

– flux imposé à la surface du moule représentant la chaleur apportée par le polymère :

$$\forall M \in \partial\Omega_{\Phi}, -\lambda_M \vec{\nabla} T \cdot \vec{n} = \Phi$$

– convection à la surface des canaux de refroidissement par le fluide de refroidissement :

$$\forall M \in \partial\Omega_{CV}, -\lambda_M \vec{\nabla} T \cdot \vec{n} = h(T - T_{\infty})$$

– surface extérieure isolée :  $\forall M \in \partial\Omega_{EX}, -\lambda_M \vec{\nabla} T \cdot \vec{n} = 0$

Conductivité du moule	$\lambda_M = 36,5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Coefficient d'échange avec le fluide	$h = 1500 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
Température du fluide	$T_\infty = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
Flux imposé à la surface du moule	$\Phi = 15000 \text{ W.m}^{-2}$

TAB. 1 – Propriétés physiques et conditions aux limites

## 2.2 Résultats

Pour un même flux de chaleur imposé à la surface de la cavité du moule (Tableau 1), la géométrie du système de refroidissement (taille et forme des canaux et éloignement par rapport à la surface du moule) a une influence sur la répartition de température dans le moule (Figure 2). L'utilisation d'un grand nombre de canaux de refroidissement permet de diminuer et d'uniformiser la température à la surface de la cavité du moule. Diminuer la distance des canaux à la surface du moule permet également de diminuer la température mais au détriment de l'uniformité.

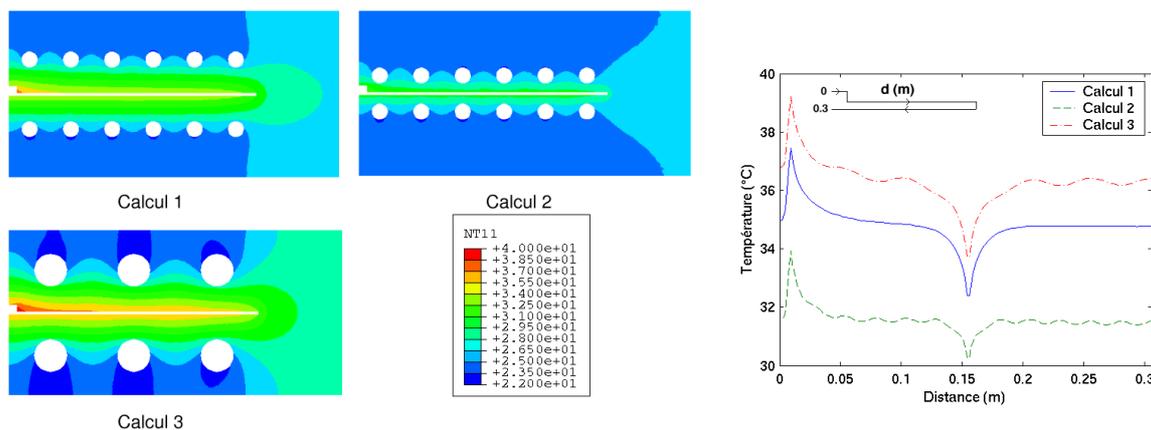


FIG. 2 – Effets de la géométrie des canaux de régulation sur la répartition de température dans le moule et en particulier sur la surface en contact avec le polymère

Ces résultats montrent l'intérêt de pouvoir disposer d'une "barrière thermique" tout autour du polymère plutôt qu'un simple puits de chaleur pour réguler la température du moule. La mise en place d'une telle "barrière thermique" serait possible en utilisant un procédé comme la stratoconception (pour réaliser un véritable échangeur de chaleur entre la pièce et le liquide de régulation). Toutefois, il est important de pouvoir connaître l'effet de la stratification sur le comportement thermique du moule.

## 3 EFFET DE LA STRATIFICATION

### 3.1 Prise en compte de la stratification dans le modèle de calcul

La stratification du moule (Figure 1) est prise en compte en introduisant une résistance thermique de contact à l'interface entre deux strates. On a alors une discontinuité des températures à l'interface proportionnelle à cette résistance et au flux :  $\forall M \in \Sigma_{M/M}, \Delta T = R\Phi$ .

La valeur de cette résistance thermique de contact est très variable selon la technique d'assemblage utilisé. Elle est estimée par le rapport de l'épaisseur  $e$  sur la conductivité  $\lambda$  de la couche d'interface (Tableau 2).

	Colle	Brasage
Épaisseur	$e = 0,3 \text{ mm}$	$e = 30 \text{ } \mu\text{m}$
Conductivité	$\lambda = 1,8 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\lambda = 410 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Résistance	$R = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$	$R = 7,3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$

TAB. 2 – Propriétés de la couche d'interface selon la technique d'assemblage (Doc. RTG, Loctite et CEA)

### 3.2 Résultats

L'effet de l'assemblage n'est visible que dans le cas d'un collage (résistance plus élevée). La résistance introduite entre les strates entraîne une dégradation des performances du moule (Figure 3) : l'assemblage perturbe la diffusion de la chaleur vers les canaux de refroidissement ce qui se traduit par une température plus élevée à

la surface du moule. Les bons résultats obtenus dans le cas du brasage ne prennent toutefois pas en compte les éventuels défauts de la brasure (porosité, épaisseur variable) qui peuvent dégrader les performances.

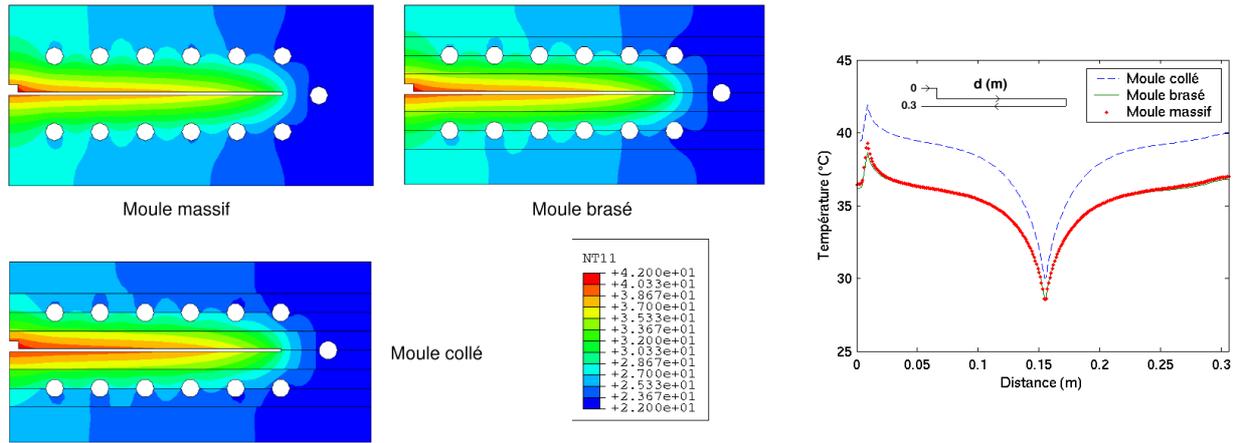


FIG. 3 – Effet de la stratification sur la répartition de température dans le moule et à sa surface

#### 4 MODÉLISATION DU REFROIDISSEMENT DE LA PIÈCE

Pour estimer l'effet de la stratification sur la température de la pièce et la durée du cycle d'injection, le refroidissement de la pièce est simulé selon un modèle transitoire décrit ci dessous.

##### 4.1 Modèle de calcul

On s'intéresse maintenant au refroidissement du polymère (polypropylène) dans le moule. Les deux domaines intervenant dans le calcul sont le moule et le polymère (Figure 4) auxquels est appliquée l'équation de la chaleur en régime transitoire :

$$\forall M \in \Omega_M, \rho_M C_M \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_M \Delta T \quad \forall M \in \Omega_P, \rho_P C_P \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_P \Delta T$$

Les propriétés thermiques (conductivité  $\lambda$ , densité  $\rho$  et chaleur spécifique  $C$ ) sont considérées constantes (Tableau 3) sur la plage de température considérée (20 à 250°C).

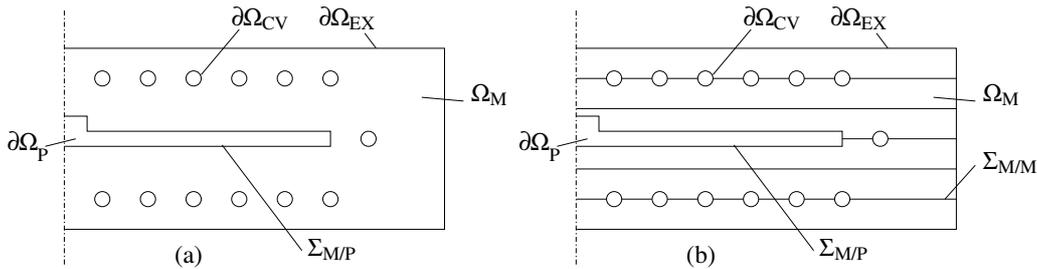


FIG. 4 – Domaines de calcul en régime transitoire sur le moule massif (a) et le moule stratifié (b)

Le contact entre le moule et le polymère est considéré imparfait. On introduit donc une résistance thermique de contact  $R_{M/P}$  à l'interface  $\Sigma_{M/P}$ . Plusieurs études ont visé à déterminer la valeur de cette résistance et son évolution au cours des différentes phases de l'injection (en particulier Quilliet, 1998). Pour simplifier l'étude, la résistance thermique est ici considérée constante. Les autres conditions limites (convection sur  $\Omega_{CX}$ , isolation sur  $\Omega_{EX}$  et contact imparfait sur  $\Sigma_{M/M}$ ) sont inchangées. La température initiale du polymère est choisie égale à la température d'injection  $T_{inj}$  (Tableau 3), on néglige les échanges thermiques entre le moule et le polymère et le réchauffement du polymère par compression et cisaillement pendant le remplissage. La température initiale du moule est celle du liquide de régulation  $T_\infty$  pour le premier cycle et celle obtenue en fin de cycle précédent par la suite.

##### 4.2 Résultats

Les résultats obtenus avec ce modèle (Figure 5) confirment ceux observés précédemment : le moule brasé permet d'obtenir des évolutions de température dans le moule et la pièce identiques à celles obtenues avec le moule

Moule	Polymère	$T_{inj} = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$
$\lambda_M = 36,5\text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$	$\lambda_P = 0,15\text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$	$T_{\infty} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
$\rho_M = 7820\text{ kg.m}^{-3}$	$\rho_P = 980\text{ kg.m}^{-3}$	$h = 1500\text{ W.m}^{-2}.K^{-1}$
$C_M = 460\text{ J.kg}^{-1}.K^{-1}$	$C_P = 1700\text{ J.kg}^{-1}.K^{-1}$	$R_{M/P} = 10^{-3}\text{ m}^2.K.W^{-1}$

TAB. 3 – Propriétés physiques des matériaux et conditions limites et initiales

massif et on constate une augmentation de la température du moule avec un assemblage collé. Cette température plus élevée a une influence sur le refroidissement de la pièce : pour une même durée de refroidissement, sa température en fin de cycle est plus élevée.

Un assemblage par brasage pourra donc être utilisé pour créer un système de régulation complexe autour de la pièce en conservant la conductivité du matériau. Le collage permettra également de réaliser des assemblages mais avec une perte de conduction perpendiculairement aux strates qu'il faudrait prendre en compte lors de la conception.

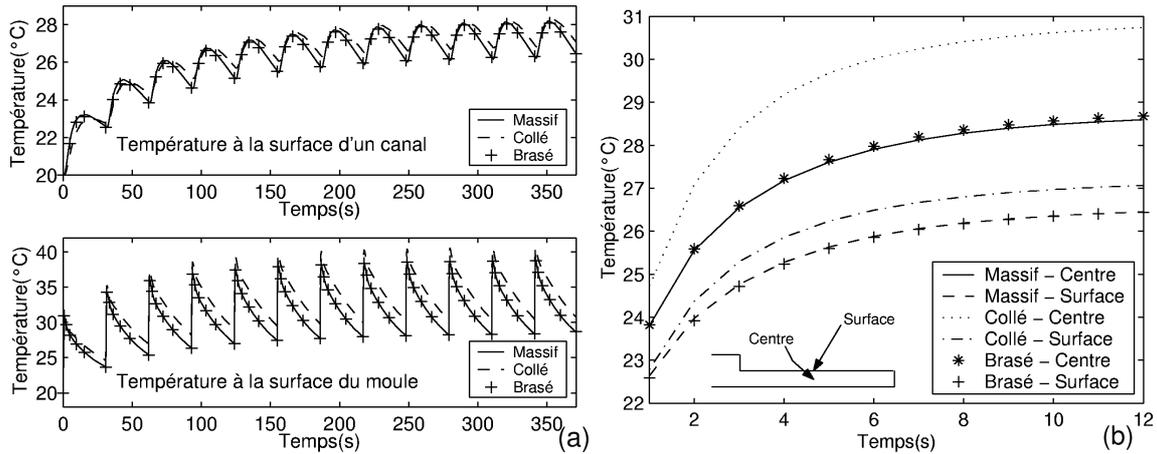


FIG. 5 – Effet de la stratification sur la température du moule (a) et de la pièce en fin de cycle (b)

## 5 CONCLUSION

Les modèles thermiques présentés ici ont permis retrouver et quantifier des tendances connues par les moulistes sur l'influence de la géométrie sur le refroidissement des moules. Ils ont également permis d'estimer l'effet de l'assemblage en strates sur le comportement thermique du moule selon la technique utilisée et montré l'avantage du brasage par rapport à la colle sur le plan thermique.

Pour une représentation plus réaliste du cycle d'injection complet, ces modèles seront développés à partir de données expérimentales obtenues sur des moules homogènes et stratifiés pour prendre en compte les phénomènes intervenant lors du remplissage (température non uniforme après remplissage et compactage), la variation de la résistance thermique de contact entre moule et polymère au cours du refroidissement (avec la pression puis le retrait du polymère) et des valeurs expérimentales des résistances thermiques de contact dues à l'assemblage des strates.

## REFERENCES

- Bryden B.G. et Pashby I.R., "Hot platen brazing to produce laminated steel tooling", *Journal of Materials Processing Technology*, **110**, (2001), pp. 206-210.
- Delaunay D., Le Bot P., Fulchiron R., Luye J.F. et Régnier G., "Nature of convection between polymer and mold in injection molding. Part 1 : Influence of a non-perfect thermal contact", *Polymer Engineering and Science*, **40**, 7, (2000), pp. 1682-1691.
- Gley J., Barlier C., Cunin D. et Velnom L., "From design to rapid tooling an application of Stratoconception : rapid tooling for foam casting", *EURO RP 2001*, 1er Juin 2001, Paris.
- Menges G. et Mohren P., "How to make injection molds", Hanser Publishers, (1993).
- Pelaingre C., Barlier C., Denis G. et Levailant C., "Moule d'extrusion-soufflage, réalisation d'outillage en Stratoconception : application à l'extrusion-soufflage", *EURO RP 2001*, 1er Juin 2001, Paris.
- Quilliet S., "Transferts thermiques à l'interface polymère-métal dans le procédé d'injection des thermoplastiques", Thèse de l'Université de Nantes, (1998).
- Xu X., Sachs E., Allen S., Cima M., "Designing conformal cooling channels for tooling", *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, (1998).