

# Amélioration du transfert de chaleur à l'interface aluminium – moule en travaillant sous hélium.

Sébastien ROUQUETTE<sup>1</sup>, Narayan PRABHU<sup>3</sup>, William GRIFFITHS<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Laboratoire de Mécanique et Génie Civil - UMR 5508 CNRS, Université de Montpellier 2, 34095 Montpellier (France). [Sebastien.rouquette@iut-nimes.fr](mailto:Sebastien.rouquette@iut-nimes.fr), +33 (0)466 628 583.

<sup>2</sup>Université de Birmingham, département Matériaux et Métallurgie, Edgbaston, Birmingham, B15 2TT (Royaume-Uni).

<sup>3</sup>Département d'ingénierie des Matériaux et de Métallurgie, Institut National Technique de Karnataka, Surathkal, Srinivasnagar, Mangalore 575025 (Inde).

**Résumé** L'amélioration de la qualité mécanique des pièces produites en fonderie ou la réduction du cycle de production passe par le développement de nouveaux procédés de coulée. Cette étude étudie la solidification de pièces en aluminium sous une atmosphère d'hélium (>95%). L'hélium est quatre fois plus conducteur de la chaleur que l'air. Les mesures de températures ont montré une réduction des temps de solidification et de production significatifs (jusqu'à 35%). Les flux de chaleur, à l'interface moule-aluminium, ont été évalués à partir des mesures de température par une méthode inverse.

## Nomenclature

$\lambda$	Conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$	$\rho$	Masse volumique, $kg.m^{-3}$
$h$	Coefficient d'échange convectif, $W.m^{-2}.K^{-1}$	$C_p$	Chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
$H_i$	Coefficient de transfert à l'interface moule – aluminium, $W.m^{-2}.K^{-1}$	$\varepsilon$	Emissivité
$\phi(t)$	Densité de flux de chaleur à l'interface moule – aluminium, $W.m^{-2}$	$T$	Température
$\vec{n}$	Normale extérieure à la frontière	$\sigma$	Constante de Stéfán, $W.m^{-2}.K^{-4}$

## 1. Introduction

Lorsque les propriétés mécaniques le permettent, on remplace les pièces en acier par des pièces en alliage d'aluminium dans le but d'alléger le poids des véhicules de transport. Le but est de réduire la consommation du carburant en réduisant le poids du véhicule et, par conséquent, une diminution des émissions de gaz polluants. De plus, la réduction du cycle de production d'une pièce coulée permet de réduire son coût de production.

L'élaboration de pièces métalliques en fonderie est un problème de solidification dans lequel la chaleur du métal en solidification est évacuée vers le moule puis vers un système de refroidissement ou non. Le problème principal est l'interface de contact métal-moule où le transfert se fait par conduction et convection initialement puis essentiellement par convection lors du retrait de la pièce au cours du refroidissement. La résistance thermique de contact augmente ce qui ralentit le refroidissement de la pièce. Argyropoulos et al.[1] ont diminué cette résistance thermique en injectant de l'hélium à l'interface métal-moule (car l'hélium est quatre fois meilleur conducteur thermique que l'air).

Dans cette étude, une enceinte hermétique a été développée pour contrôler la teneur en hélium (>95%) afin d'évaluer son effet sur le coefficient de transfert à l'interface ainsi que son effet sur le refroidissement global de la pièce. Le moule utilisé dans cette étude est en zircone et le métal est un alliage d'aluminium A356 (Al Si Mg). Les premières expériences menées sous air et sous hélium ont montré une amélioration du transfert de la chaleur.

Le travail présenté dans cette communication a pour but d'évaluer le coefficient de transfert de chaleur à l'interface métal-moule sous air et sous hélium. Le coefficient de transfert de chaleur est un des paramètres clés dans la simulation des procédés de fonderie. Son estimation viendra enrichir la base de donnée pour être utilisé dans des simulations afin d'optimiser la géométrie du moule, etc. Une

modélisation thermique 2D axisymétrique du moule en zirconium associé à une méthode thermique inverse ont été employées pour estimer, d'abord le flux de chaleur à l'interface moule-métal, puis le coefficient de transfert de chaleur a été déduit.

## 2. Dispositif et protocole expérimental

Le dispositif expérimental est présenté sur la **figure 1** : il se compose d'une enceinte métallique avec deux portes, d'un four à creuset de 12 litres et d'une puissance de 10 kW, d'une pompe à vide Edwards, d'une bouteille d'Hélium et d'un appareil de mesure de la concentration en Hélium. La partie droite de l'enceinte, **figure 1**, est réservée aux différents moules utilisés (sable, acier ou céramique). L'enceinte a été équipée avec 16 câbles d'extension pour connecter des thermocouples de type K.

Les thermocouples de type K ont été fabriqués par nos soins. Les fils du thermocouple (0,2 mm de diamètre) ont été glissés dans une gaine rigide en alumine de diamètre 0,3 mm. Un poste à souder à décharge capacitive a été utilisé pour effectuer la jonction. Chaque thermocouple K a été contrôlé en mesurant la température de solidification d'un bain d'aluminium pur (il admet un palier à 660°C lors du dégagement de la chaleur latente). Les thermocouples qui ont montré un écart supérieur à ce palier de  $\pm 1$ C n'ont pas été employés.

Les moules en zirconium sont préparés en mélangeant du zirconium (sec) avec un liant chimique (appelé pepset). Le sable et le liant chimique sont brassés dans une mélangeuse. L'ensemble est versé dans un moule en bois pour former le moule en zirconium, **figure 2**. On laisse reposer l'ensemble une heure avant d'ôter le moule en bois. Il faut ensuite l'instrumenter avec les thermocouples et assembler les deux parties du moule avec une colle spéciale haute température : corfix 21.



Figure 1 : dispositif expérimental : enceinte avec le four à creuset inclinable (à gauche, premier plan).

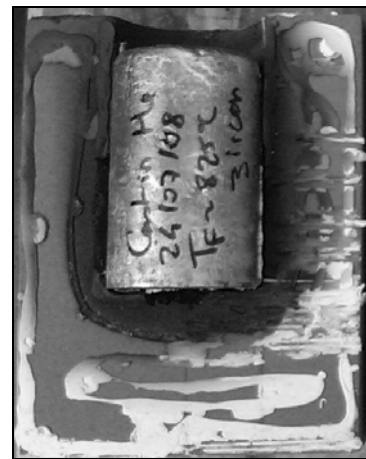


Figure 2 : pièce en alliage d'aluminium A356 (Al-Si-Mg) élaborée sous hélium.

Le protocole expérimental est le suivant :

- Placer le moule en sable dans l'enceinte et connecter les thermocouples K à la centrale d'acquisition,
- Evaluer la charge d'aluminium A356 à mettre dans le four (dans le cas ici présent 1,35 kg) et mettre le four en marche,
- Fermer les portes de l'enceinte et mettre l'enceinte sous vide « partiel » (0,5 bar),
- Contrôler la température de l'aluminium liquide jusqu'à atteindre une température d'équilibre de 800°C,
- Remettre l'enceinte sous pression atmosphérique sous air ou sous hélium (selon le type d'expérience). La concentration en hélium doit être supérieure à 95%,
- Mettre en route la centrale d'acquisition thermique,
- Verser l'aluminium liquide dans le moule. Un bassin surplombe le moule afin de limiter les projections et d'obtenir un meilleur remplissage du moule.

- Attendre que la pièce en aluminium soit solidifiée et que sa température permette d'être manipulée (~400°C).
- L'ensemble moule-aluminium est extrait de l'enceinte. Le moule est démonté en deux parties afin de vérifier la position des thermocouples, **figure 2**.

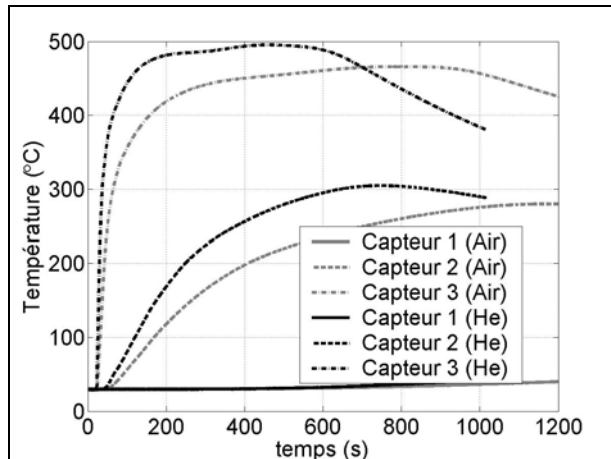


Figure 3 : Températures mesurées dans le moule en zirconium pour deux cas expérimentaux différents : sous air (gris) et sous hélium (noir).

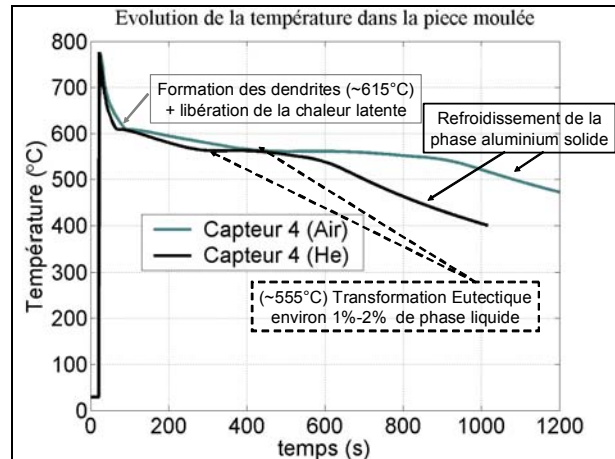


Figure 4 : Températures mesurées dans la pièce en Aluminium au cours de la solidification : sous air (gris) et sous hélium (noir).

Les températures mesurées dans le moule et l'aluminium en cours de solidification sont présentées dans les **figures 3 et 4**. Les courbes de température grises représentent l'expérience faite sous air tandis que les courbes de températures noires représentent l'expérience faite sous hélium. On remarque que la température mesurée aux capteurs 2 et 3 sous hélium est largement supérieure à celles mesurées sous air ( $50^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{\text{He-Air}} \leq 100^{\circ}\text{C}$ ), **figure 3**. De plus, le refroidissement est plus rapide: le capteur 3 passe en dessous de  $400^{\circ}\text{C}$  après 900s sous hélium contre 1300s sous air. A partir de ces mesures, on constate une amélioration du transfert de chaleur à l'interface moule-aluminium (les températures sont plus élevées sous hélium) ainsi que dans le moule et les échanges moule-extérieur (car le refroidissement est plus rapide).

L'évolution de la température dans la pièce en aluminium au cours de la solidification est reportée sur la **figure 4**. Une différence apparaît lors de la solidification ( $T > 550^{\circ}\text{C}$ ). La pièce en aluminium, élaborée sous hélium, a solidifié plus rapidement : en 500s contre 800s environ sous air. Le palier eutectique a été atteint 34% plus tôt sous hélium. Une fois l'aluminium solidifié ( $T < 550^{\circ}\text{C}$ ), l'aluminium a refroidi plus vite : environ 37% de temps en moins pour atteindre  $410^{\circ}\text{C}$  sous hélium. Quelle a été l'amélioration du transfert de chaleur à l'interface moule-aluminium? C'est ce que l'on va quantifier dans les sections suivantes.

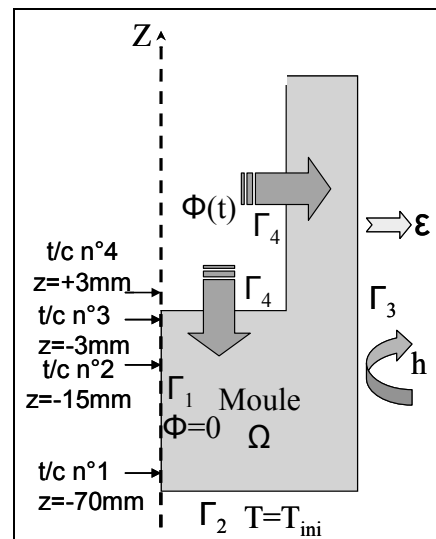


Figure 5 : Modélisation thermique du moule en zirconium.

### 3. Modélisation thermique et problème inverse pour l'estimation du flux de chaleur à l'interface moule / pièce coulée

La modélisation thermique est limitée au moule en zirconium afin de simplifier l'étude de l'estimation du flux de chaleur à l'interface moule-aluminium. La géométrie réelle de

l'ensemble moule–aluminium est présentée dans la **figure 2**. La géométrie retenue pour la modélisation thermique du moule est exposée dans la **figure 5**.

Soit  $\Omega=\{r, z\}$  le domaine étudié,  $\Gamma_i$  sont les différentes frontières du domaine  $\Omega$  et  $I$  est l'intervalle de temps considéré. Le problème thermique est décrit par les équations (1) à (6) suivantes :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \Delta T = 0 \quad \text{dans } \Omega \times I \quad (1)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n_1} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_1 \times I \quad (2)$$

$$T(r, z_0) = T_{ini} \quad \text{sur } \Gamma_2 \times I \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n_3} = h(T - T_{ini}) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_{ini}^4) \quad \text{sur } \Gamma_3 \times I \quad (4)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n_4} = \varphi(t) \quad \text{sur } \Gamma_4 \times I \quad (5)$$

$$T(r, z; t = 0) = T_{ini} \quad \text{dans } \Omega \quad (6)$$

Les coefficients d'échange convectif et d'émissivité sont supposés constants en fonction de la température, frontière  $\Gamma_3$ . Le coefficient d'émissivité n'a pas été linéarisé du fait de la forte variation de température dans la partie latérale ( $\Gamma_3$ ) supérieure du moule en zircone (~300-400°C), **figure 5**. Les propriétés thermophysiques du zircone ont été mesurées par méthode flash par la société Netzsch®, table 1. La caractérisation thermophysique du zircone a été faite à la fois sous hélium et sous air à cause des espaces gazeux entre chaque grains de « sable » de zircone, table 1. On remarque qu'un échantillon de zircone sous hélium est 60% plus conducteur de la chaleur que sous air, table 1.

	$\rho^*$	$C_p^*$	$\lambda^*$	$h$	$\varepsilon$
	$kg.m^{-3}$	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	$W.m^{-1}.K^{-1}$	$W.m^{-2}.K^{-1}$	
Dans l'air	2850	542	0.626	15	0.1
Dans l'hélium	2850	542	1.066	15	0.1

Table 1 : propriétés thermophysiques du zircone (\*valeurs fournies par la compagnie Netzsch®).

Le problème inverse de la conduction de la chaleur va consister à estimer le flux de chaleur  $\varphi(t)$  à l'interface moule-aluminium  $\Gamma_4$ . Le flux de chaleur considéré sur l'interface  $\Gamma_4$  dépend du temps à cause des différents phénomènes [1] survenant lors de la solidification (passage de l'état liquide à solide, transformation eutectique) et du refroidissement (contraction thermique de la pièce coulée qui accroît l'épaisseur de la lame de gaz entre la pièce et le moule). Le coefficient de transfert de chaleur est déduit du flux de chaleur par la relation suivante :  $H_i = \varphi(t) / (T_i^{Al}(t) - T_i^{Zr}(t))$  (7)

où l'indice  $i$  dénote l'interface moule–aluminium. Il existe des modélisations plus complexes comme suggéré par Hallam et al. [2]. Le coefficient  $H_i$  est évalué au point  $r = 0$  et  $z = z_i$ ,  $z_i$  est l'interface moule-aluminium.

#### 4. Résultats de l'inversion thermique

Le flux de chaleur à l'interface moule–aluminium a été estimé à partir d'une méthode inverse. La méthode du gradient conjugué développée par O.M. Alifanov [3] a été retenue. La méthode du gradient conjugué est efficace pour résoudre un problème d'estimation où le nombre de paramètres à estimer est très grand (entre 6000 et 10000 dans le cas présent). La formulation du problème thermique inverse est basée sur la minimisation d'une fonction de

coût (ou critère quadratique) : différence entre la température calculée  $T(r, z, t)$  et la température mesurée  $\hat{T}_m(t)$ . La formulation est la suivante :

Trouver  $\varphi(t)$  tel que  $T(r, z, t; \varphi) = \hat{T}_m(t; \varphi)$ ,  $m = 1, n_c$  où  $n_c$  est le nombre de capteurs.

Formulé au sens des moindres carrés, le problème consiste à minimiser la fonctionnelle

suyvante :

$$J(T, \varphi) = \int_{t_0}^{t_f} \int_{\Omega} \sum_{m=1}^{n_c} (T(r, z, t; \varphi) - \hat{T}_m(t))^2 \delta(\bar{x} - \bar{x}_m) dt d\Omega \quad (8)$$

La méthode du gradient conjugué approche la fonction inconnue  $\varphi$  de manière itérative par la relation  $\varphi^n = \varphi^{n-1} - \gamma^n d^n$ . La direction de descente  $d^n$  nécessite le calcul du gradient  $J'(\theta, h)$  de la fonctionnelle (8) par l'intermédiaire du problème adjoint. Le problème en sensibilité permet de trouver l'expression de la profondeur de descente  $\gamma$ . Des détails sur l'obtention des problèmes adjoint et en sensibilité sont donnés dans le livre de O.M. Alifanov [3] ainsi que dans la thèse de R. Abou khache [4].

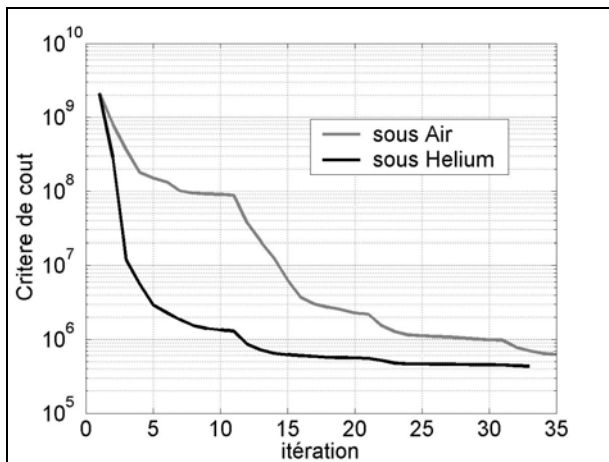


Figure 6 : Evolution du critère de coût lors de l'estimation du flux de chaleur à l'interface moule / aluminium sous air (gris) et sous hélium (noir).

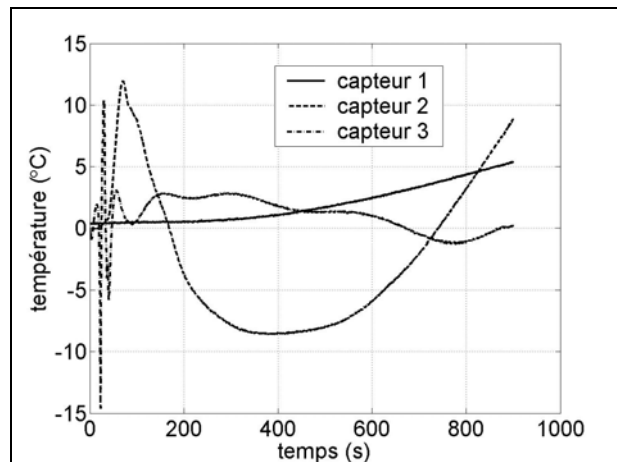


Figure 7 : Différence entre les températures mesurées et les températures calculées après résolution du problème inverse sous hélium.

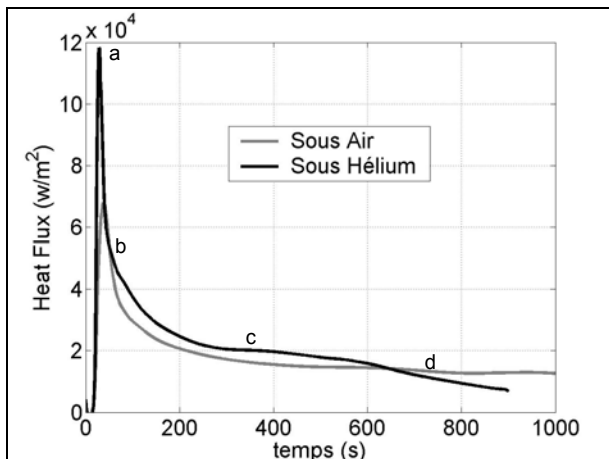


Figure 8 : Evolution du flux de chaleur à l'interface moule-aluminium estimé sous air (gris) et sous hélium (noir).

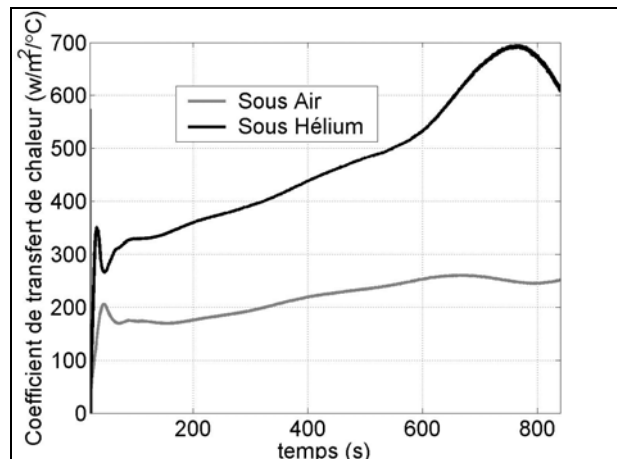


Figure 9 : Evolution du coefficient de transfert de chaleur à l'interface moule-aluminium sous air (gris) et sous hélium (noir).

La **figure 6** présente l'évolution de la fonction de coût pour les deux cas traités : solidification sous air et sous hélium. Les deux fonctions de coût ont convergé rapidement vers un plateau après 20 itérations. La valeur finale de ces fonctions de coût a conduit à une erreur moyenne  $\sigma$ , sur les mesures, d'environ :  $\pm 9^\circ\text{C}$  sous air et  $\pm 7^\circ\text{C}$  sous hélium.

Les écarts entre les températures mesurées et calculées sont présentés sur la **figure 7**. La température calculée au capteur 3 coïncide bien avec la température mesurée tandis que pour les thermocouples 1 et 2 les écarts sont plus importants. Les capteurs 1 et 2 sont les plus éloignés de l'interface, l'incertitude sur la conductivité thermique et la qualité du contact thermique thermocouple/moule affectent les résultats.

On constate que le flux de chaleur estimé sous hélium (noir) est 80% plus important dans les 15 premières secondes puis se stabilise autour de valeurs 25% supérieures à celles estimées sous air, **figure 8**. On observe un pic important dans chaque cas, 15 premières secondes, qui est dû au contact de l'aluminium liquide à une température de 800°C avec un moule à la température initiale de ~26°C. On remarque différentes phases dans l'évolution du flux de chaleur (courbe noire): la phase solidification qui débute en b et se termine en c (si on compare avec la **figure 4**, b correspond à la formation des premières dendrites et c au début de la transformation eutectique ~350s). Au point d, on observe une décroissance linéaire du flux de chaleur qui correspond à une stabilisation du retrait de l'aluminium à l'interface moule-aluminium[1].

Le coefficient de transfert de chaleur à l'interface a pu être déduit d'après l'équation (7). Ces deux coefficients de transfert de chaleur sont reportés sur la **figure 9**. Le coefficient de transfert calculé sous hélium est presque deux fois plus important que celui calculé sous air. La valeur initiale de  $H_i$  est environ  $350 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  sous hélium contre  $200 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  sous air. Le coefficient  $H_i$  continue de croître dans le temps. Cette augmentation est due au fait que l'écart de température entre l'aluminium et le moule est quasi nul alors que la valeur du flux de chaleur est encore grande en fin de calcul. Ce comportement a été attribué à l'imprécision sur la position des capteurs ( $\pm 1 \text{ mm}$ ) ainsi qu'à la méconnaissance de la conductivité thermique du zircon (qui dépend de la température).

## 5. Conclusions

Dans cette communication, un dispositif expérimental a été développé pour caractériser précisément l'effet de l'hélium sur le transfert de chaleur à l'interface aluminium-moule au cours de la solidification. Ce dispositif a été mis au point pour obtenir une concentration en hélium supérieure à 95% (expérimentalement mesuré entre 96% et 97%).

Les mesures de températures ont montré que le flux de chaleur à l'interface aluminium-moule a été amélioré de plus de 25% et que cela se traduisait par une diminution du temps de solidification de 34% et un temps final de refroidissement qui est réduit de 37%. Le coefficient de transfert calculé à l'instant initial est de l'ordre de grandeur ( $350 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) de ceux rencontrés dans la littérature pour des moules en sable. La valeur du coefficient de transfert de chaleur semble faussé sur la fin de l'intervalle d'étude à cause de l'imprécision sur la position des thermocouples ainsi qu'à une méconnaissance de la conductivité thermique du zircon.

## Références

- [1] S. A. Argyropoulos and H. Carletti, Comparisons of the effects of air and helium on heat transfer at the metal-mold interface, *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 39, issue 3 (2008) 457-468.
- [2] C.P. Hallam and W.D. Griffiths, A model of interfacial heat transfer coefficient for the aluminium gravity die-casting process, *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 35B (2004) 721-733.
- [3] O.M.Alifanov, E.A.Artyukhin et S.V. Rumyantsev, Extreme Methods for Solving Ill-Posed Problems with Applications to Inverse Heat Transfer Problems, *Begell house Inc.* (1995) pp. 306.
- [4] R. Abou khachfe, Résolution numérique de problèmes inverses 2D non linéaires de conduction de la chaleur par la méthode des éléments finis et l'algorithme du gradient conjugué. Validation expérimentale. *Thèse de Doctorat de l'école polytechnique de l'université de Nantes*, N° ED 82-451, Juin 2000.