

Simulation Numérique des Champs Dynamique et Thermique Durant le Moulage par Injection à Haute Pression des Métaux

Mohammed Choukri KORTI¹, Abdel Illah Nabil KORTI¹, Said ABBOUDI²

¹Université de Tlemcen, Laboratoire ETAP, Faculté de Technologie, Département de Mécanique,
B. P. 230, Tlemcen 13000, Algérie.

²UTBM, Institut IRTES, laboratoire M3M, département EDIM, site de Sévenans,
90010 Belfort Cedex, France.

Email: kortichoukri@yahoo.fr, korti72@yahoo.fr

Résumé : Dans l'industrie des métaux moderne, le procédé de moulage mécanique sous pression (MMSP) est l'une des techniques de fabrication utilisées dans la plupart des processus industriels. L'occlusion d'air provoquée par l'écoulement du métal liquide durant la phase lente d'injection est l'un des facteurs qui contribue au défaut de porosité dans le MMSP avec chambre froide horizontale. L'objectif de cette étude est d'analyser une loi d'accélération du piston afin de réduire au minimum l'occlusion d'air durant la phase lente d'injection, et de réduire ainsi la porosité dans les pièces fabriquées. Un modèle numérique tridimensionnel, basé sur les équations de la conservation de la masse, la quantité de mouvement et l'équation d'énergie, a été développé et employé pour simuler l'écoulement du métal liquide dans la chambre d'injection. Le suivi de la surface libre est assuré par la méthode VOF. Vu le déplacement du piston, la géométrie du domaine est variable et la résolution numérique utilise un maillage dynamique. Cette simulation est effectuée par le code de calcul « FLUENT ». Les quantités d'occlusion d'air pour différents profils de vitesses d'injection ont été étudiées. Les résultats prouvent qu'il existe une vitesse optimale du piston permettant de minimiser au maximum l'occlusion de gaz dans le cylindre d'injection.

Mots clés : Machine à MMSP, phase lente d'injection, loi d'accélération du piston, surface libre, Volume of Fluid, FLUENT, occlusion d'air.

1. Introduction

Le processus de MMSP présente de nombreux avantages tels que la production rationnelle de pièces en grandes séries à côtes finies et à tolérances serrées avec un état de surface de haute qualité. Le défaut le plus commun dans les pièces fabriquées avec cette technique, est la porosité interne. L'une des principales causes est l'air emprisonné dans le métal liquide pendant les deux premières phases de remplissage du processus de MMSP. La porosité interne peut également apparaître sous la forme d'un rétrécissement, en raison de la solidification prématurée du métal. Normalement, les principales variables contrôlées sont la température du moule, le volume du dosage, les vitesses lentes et rapides, les pressions d'injection, ainsi que la qualité métallurgique, la composition chimique et la température des matériaux à l'état liquide. Le processus de MMSP avec chambre froide horizontale comporte principalement un cylindre d'injection permettant l'injection du métal fondu au moule à l'aide d'un piston. À l'étape initiale, le cylindre d'injection est partiellement rempli avec le métal fondu avec le taux de remplissage dépend de la pièce à mouler et le diamètre du cylindre d'injection. Pour réduire au minimum l'occlusion d'air, le processus d'injection est généralement divisé en deux phases : une phase au cours de laquelle le piston se déplace lentement afin de réduire la quantité d'air emprisonné, et une phase rapide qui commence lorsque le cylindre d'injection est complètement rempli de métal liquide.

Dans ce travail, l'attention a été concentrée sur la phase lente, au cours de laquelle, le déplacement du piston pousse le métal liquide vers le haut et forme une vague qui se déplace avec une vitesse voisine à celle du piston et remplit la partie supérieure du cylindre d'injection (initialement vide), en suite se déplace à une vitesse constante jusqu'à ce que le cylindre d'injection soit complètement rempli de métal liquide (Figure 1).

Les travaux publiés par J.R. Brevick [1] ont montré qu'il y a une vitesse optimale de piston qui peut provoquer une vague permettant de remplir la chambre d'injection avec un minimum d'occlusions d'air. Si le piston atteint une vitesse plus importante que cette vitesse optimale, le front de la vague peut s'enrouler et causer l'occlusion d'air. Si le piston n'atteint pas cette valeur optimale, la vague peut se refléter contre le fond de la chambre d'injection et emprisonner l'air dans le métal fondu. L'influence de la vitesse de piston, de l'accélération et du rapport de remplissage sur le procédé d'injection a été étudiée théoriquement par plusieurs auteurs [2]-[5]. Les études expérimentales ont été effectuées par [3], [6].

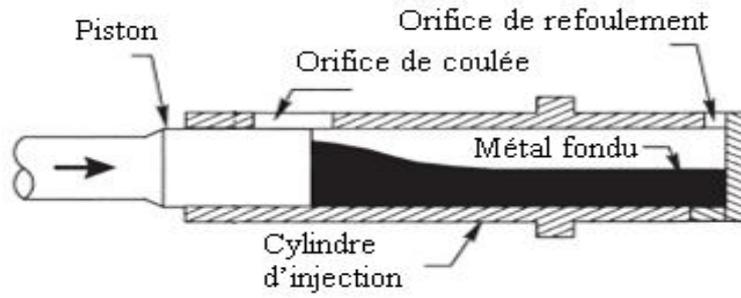


Figure 1 : Représentation schématique du système d'injection d'une MMSp avec la chambre froide horizontale.

2. Model mathématique

2.1. Géométrie du problème

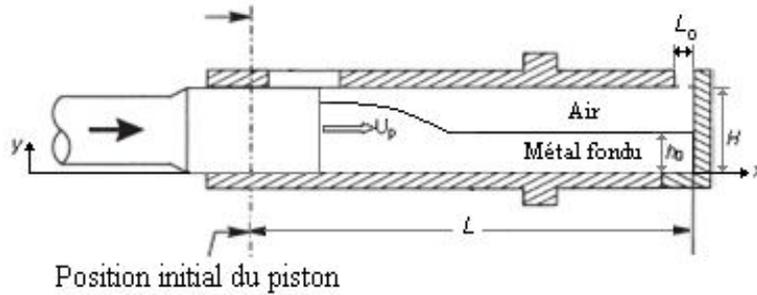


Figure 2 : Représentation schématique du problème et le système de coordonnées

Le modèle étudié est un cylindre horizontal de diamètre H , de longueur L et d'orifice de refoulement L_0 , (figure 2). Le piston se déplace suivant le sens positif des x avec une vitesse variable. Initialement, le cylindre est rempli avec de l'aluminium liquide pur dont les propriétés thermodynamiques sont dépendantes de la température. Le taux du remplissage, h_0 , est de 33 % de diamètre du cylindre [7].

2.2. Equations gouvernantes

La (figure 2) montre une représentation schématique du problème et le système de coordonnées. Pour les écoulements multi-matériau incompressible, les équations de Navier-Stokes peuvent être combinées en une seule équation dans l'ensemble du domaine d'intérêt. Les équations de conservation et d'énergie régissant l'écoulement tridimensionnel d'un fluide newtonien, incompressible, instationnaire, multi-fluide sont données par les expressions suivantes :

Conservation de la masse :

$$\partial (u - u_g) / \partial x + \partial v / \partial y + \partial w / \partial z = 0 \quad (1)$$

Conservation de la quantité de mouvement : Les équations de quantité de mouvement en z - et r -directions ont respectivement les formes suivantes

$$\rho (\partial u / \partial t + (u - u_g) \partial u / \partial x + v \partial u / \partial y + w \partial u / \partial z) = -\partial P / \partial x + \mu (\partial^2 u / \partial x^2 + \partial^2 u / \partial y^2 + \partial^2 u / \partial z^2) \quad (2)$$

$$\rho (\partial v / \partial t + (u - u_g) \partial v / \partial x + v \partial v / \partial y + w \partial v / \partial z) = -\partial P / \partial x + \mu (\partial^2 v / \partial x^2 + \partial^2 v / \partial y^2 + \partial^2 v / \partial z^2) + (\rho - \rho_0)g \quad (3)$$

$$\rho (\partial w / \partial t + (u - u_g) \partial w / \partial x + v \partial w / \partial y + w \partial w / \partial z) = -\partial P / \partial x + \mu (\partial^2 w / \partial x^2 + \partial^2 w / \partial y^2 + \partial^2 w / \partial z^2) \quad (4)$$

u_g représente la composante de la vitesse de la grille utilisée pour simuler l'effet variable et mobile du domaine.

Conservation de l'énergie :

$$\rho c_p (\partial T / \partial t + u \partial T / \partial x + v \partial T / \partial y + w \partial T / \partial z) = \lambda (\partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2 + \partial^2 T / \partial z^2) - S_h \quad (5)$$

avec

$$S_h = \begin{cases} L_s [\partial (\rho_2 f_l) / \partial t + \partial (\rho_2 u f_l) / \partial x + \partial (\rho_2 v f_l) / \partial y + \partial (\rho_2 w f_l) / \partial z] & C = 1 \\ 0 & C < 1 \end{cases} \quad (6)$$

2.3. Conditions aux limites

La condition de non-glissement est imposée aux parois de la chambre d'injection et la pression est fixée à l'entrée de la cavité de moule. Le refroidissement des parois du cylindre peut être simulé comme un échange convectif. A la paroi mobile (piston), on suppose que le fluide a une vitesse horizontale (dans la direction appropriée) qui suit la loi variable de la vitesse du piston U_p dans le cylindre d'injection [7] :

$$U_p = \begin{cases} \alpha\beta (e^{\alpha t} - 1) \rightarrow si \rightarrow t \leq t_h \\ 2[\sqrt{gH} - \sqrt{gh_0}] \rightarrow si \rightarrow t > t_h \end{cases} \quad (7)$$

où α et β sont des constantes réelles positives et

$$t_h = [1/\alpha] \ln [2(\sqrt{gH} - \sqrt{gh_0})/\alpha\beta + 1] \quad (8)$$

3. Résultats et discussions

Le modèle VOF développé dans le logiciel FLUENT a été utilisé pour simuler des écoulements biphasés. Le couplage pression-vitesse est réalisé à l'aide du schéma PISO [8] (Pressure-Implicit with Splitting of Operators). Dans cette étude, nous verrons en premier lieu, l'étude dynamique du processus, qui montre l'influence de la vitesse du piston sur le profil de la surface libre d'aluminium liquide pour différentes valeurs de α , durant la phase d'injection. En deuxième lieu, on introduit la partie thermique dans les calculs pour voir l'influence de la température sur le profil de l'écoulement du métal liquide.

3.1. Validation

La (figure 4) donne une comparaison entre les résultats numériques des profils de la surface libre dans le cylindre d'injection à différent instants obtenus numériquement avec le nouveau modèle proposé et ceux fournis par le modèle basé sur l'approximation shallow-water et avec le code PHOENICS. On remarque qu'il y a un très bon accord entre les résultats simulés et ceux publiés dans [9]. Ce ci montre la bonne précision de la méthode proposé dans ce travail.

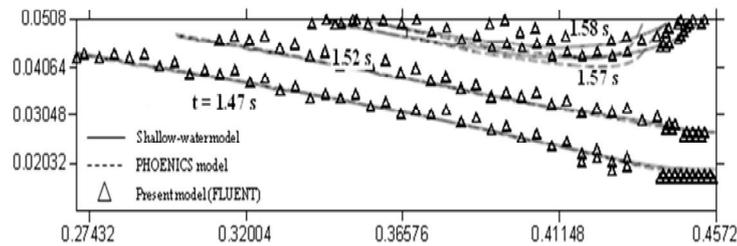


Figure 3. Comparaison entre les résultats numériques des profils de la surface libre à différent instants dans le cylindre d'injection (approximation shallow-water, PHOENICS et FLUENT).

3.2 Evolution du profil de la surface libre pour différentes accélérations (Etude Dynamique)

3.2.1. Accélération pour $\alpha = 1,35$

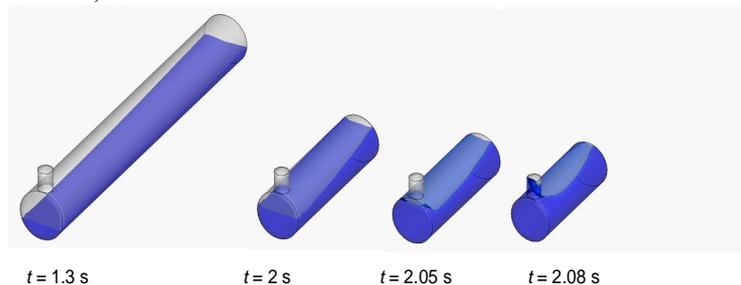


Figure 4. Evolution du profil de la surface libre dans le temps pour $\alpha = 1,35$.

La (figure 6) montre l'évolution du profil de la surface libre du métal liquide en fonction du temps pour une valeur de $\alpha = 1,35$. Dès que le piston commence à se déplacer, il pousse le métal liquide vers le haut en provoquant la création d'une vague juste devant le piston ($t = 1,3$ s). Lorsque ce dernier se déplace plus loin, il pousse la vague qui se déplace en avant avec une vitesse plus importante que le piston. Quand la vague atteint l'extrémité du cylindre, sa hauteur augmente jusqu'à atteindre le haut du cylindre et ferme l'orifice de refoulement. A $t = 2,08$ s, on peut voir facilement que l'air est emprisonné entre le piston mobile et la vague.

3.2.2. Accélération pour $\alpha = 2,2$

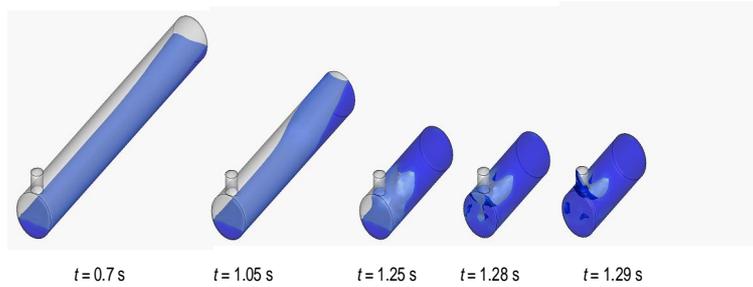


Figure 5. Evolution du profil de la surface libre dans le temps pour $\alpha = 2,2$.

La (figure 5) montre l'évolution du profil de la surface libre du métal liquide en fonction du temps pour une valeur de $\alpha = 2,2$. Dès que le piston commence à se déplacer, il pousse le métal liquide vers le haut en provoquant la création d'une vague dont la hauteur monte rapidement avec le temps jusqu'à atteindre le haut du cylindre. Nous remarquons que le piston se déplace plus rapidement que la vague. Avec le déplacement du piston, la vague a tendance de tomber en enfermant une quantité d'air ($t = 1.25$ s). Le métal liquide qui se trouve en haut du cylindre, a tendance à son tour de tomber en enfermant une autre quantité d'air ($t = 1.28$ s). Les grandes vitesses peuvent entraîner d'importantes turbulences dans le métal en engendrant la création des pores dans le métal fini.

3.2.3. Accélération pour $\alpha = 1,71$

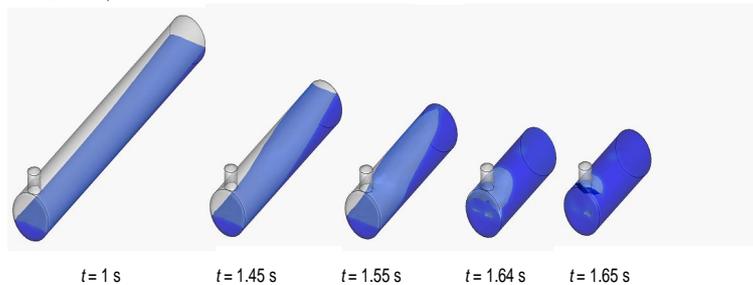


Figure 6. Evolution du profil de la surface libre dans le temps pour $\alpha = 1,71$.

La (figure 6) montre l'évolution du profil de la surface libre du métal liquide en fonction du temps pour une valeur de $\alpha = 1,71$. Les résultats montrent que le déplacement du piston pousse le métal liquide vers le haut et forme une vague idéal qui se déplace avec une vitesse voisine à celle du piston. La vague évacue presque la totalité d'air contenu dans le cylindre d'injection à travers l'orifice de refoulement. Donc, Il n'y a que de faibles occlusions d'air dans le métal liquide observées au fond du cylindre d'injection à ($t = 1,64$ s). Le faible emprisonnement d'air peut fournir un métal fini sans pores. Ce cas est donc le plus favorable pour une meilleure qualité des métaux et la valeur de $\alpha = 1,71$ fournit la vitesse optimale du piston.

3.3. Evolution du profil de la surface libre pour α optimale (Etude Dynamique et Thermique)

3.3.1. Accélération pour $\alpha = 1,71$

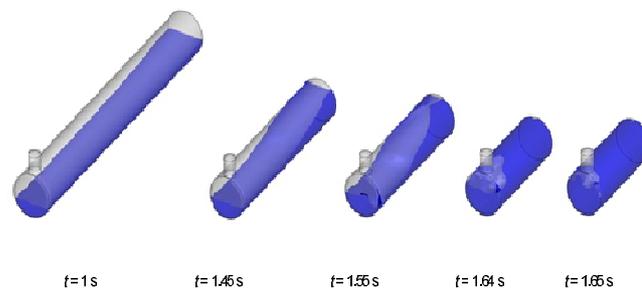


Figure 7. Effet de la température sur évolution du profil de la surface libre dans le temps pour $\alpha = 1,71$.

Les figures 6 et 7 montrent l'évolution du profil de la surface libre du métal liquide en fonction du temps, respectivement, sans et avec l'effet de l'écoulement convectif. La (figure 6) montre que le déplacement du piston pousse le métal liquide vers le haut et forme une vague idéal qui se déplace avec une vitesse voisine à

celle du piston. La vague évacue presque la totalité d'air contenu dans le cylindre d'injection à travers l'orifice de refoulement. Donc, Il n'y a presque aucune occlusion d'air dans le métal liquide à l'intérieur du cylindre d'injection. L'absence de l'emprisonnement d'air peut fournir un métal fini sans pores. Cependant, à $t = 1,55$ s, la (figure 7) montre la présence d'une certaine quantité d'air entre le haut du cylindre et le piston. A $t = 1,64$ s, il y a absence de pores à l'extrémité du cylindre, mais, la vague est nettement moins stable. A $t = 1,65$ s, la vague cerne moins parfaitement l'air ce qui entraîne un risque d'emprisonnement. Cette comparaison montre qu'il est difficile de négliger l'effet de la température durant l'étude numérique de l'injection des métaux liquide.

4. Conclusion

Le présent travail porte sur la simulation numérique de l'écoulement de l'aluminium liquide avec surface libre durant son injection dans la cavité du moule à partir du cylindre d'injection, afin d'éliminer la création des pores dans le modèle fini. Le modèle proposé est tridimensionnel et prend en considération le transfert thermique. Cette étude examine une loi d'accélération du piston a fin d'optimiser la phase lente d'injection dans les machines à MMSP horizontales avec chambre froide. Les profils des vagues forcées par le mouvement du piston dans la chambre d'injection ont été calculés pour analyser l'occlusion d'air dans le cylindre d'injection. L'étude dynamique de l'écoulement du métal liquide dans le cylindre d'injection examine trois différentes valeurs du paramètre d'accélération α (1,35, 1,71 et 2,2) avec un rapport de remplissage de 33% du diamètre du cylindre. Les résultats obtenus, prouvent qu'il existe une vitesse optimale du piston sous laquelle on élimine presque la totalité d'emprisonnement d'air dans le métal liquide durant son injection. Dans l'étude thermique, les résultats montrent qu'il y a un changement remarquable sur le profile de l'écoulement du métal liquide. Une petite quantité d'air est emprisonnée contre le métal est le haut du cylindre d'injection. Les résultats trouvés avec l'étude dynamique seule, montre il n'y a aucune occlusion d'air dans cette région. Le profile de la vague est nettement plus turbulent dans l'étude thermique par rapport à celui de l'étude dynamique. On peut conclure qu'il est difficile de négliger l'effet de la température dans le MMSP.

Nomenclature

C_p	chaleur spécifique, $J.Kg^{-1}.K^{-1}$	ρ	masse volumique, $Kg.m^{-3}$
C	fraction volumique	ρ_0	masse volumique de référence, $Kg.m^{-3}$
T	température, K	μ	viscosité dynamique, $Kg.m^{-1}.s^{-1}$
P	pression, Pa	λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
t	variable du temps, s		
u, v, w	composants de la vitesse dans les coordonnées cartésiennes x, y et z , $m.s^{-1}$	Exposant, Indices	
g	accélération de la gravité	1	liquide
L_s	chaleur latente de fusion, $J.Kg^{-1}$	2	aluminium liquide
f_l	fraction liquide		
U_p	vitesse du piston, s		
t_h	le temps ou le métal fondu atteint le haut du cylindre d'injection		
S_h	terme source spécifiques au changement de phase		

Références

- [1] J. R. Brevick et M. Duran, et Y. Karni, Experimental Determination of Slow Shot Velocity Position Profile to Minimize Air Entrapment, North American Die Casting Association, Transactions of 16th International Die Casting Congress and Exposition, Sept 30-Oct 3 (Detroit), Pages 399-404, 1991.
- [2] F. Faura et J. Lopez et J. Hernandez, On the Optimum Plunger Acceleration Law in the Slow Shot Phase of Pressure Die Casting Machines, Int. J. Machine Tools Manuf., Volume 4, Pages 173-191, 2001.
- [3] L.W. Garber, Theoretical Analysis and Experimental Observation of Air Entrapment during Cold Chamber Filling, Die Cast. Engineer, Volume 26, Pages 14-22, 1982.
- [4] T. C. Tszeng et Y. L. Chu, A Study of Wave Formation in Shot Sleeve of a Die Casting Machine, Journal of Engineering for Industry, Volume 116, Pages 175-182, 1994.
- [5] M. C. Thome et J. R. Brevick, Modeling Fluid Flow in Horizontal Cold Chamber Die casting Shot Sleeves, Trans. Am. Foundry men's Soc., volume 102, Pages 343-348, 1993.
- [6] M. Duran, Minimization of Air Entrapment in the Shot Sleeve of a Die Casting Machine to Reduce Porosity, Report No. ERC/NSM-C-91-31, The Ohio State University, July, 1991.
- [7] P. Gomez et J. Hernandez et J. Lopez et F. Faura, Numerical simulation of free surface flows in die casting injection processes, The Phoenix Journal of Computational Fluid Dynamics, Volume 13, Pages 186-203, 2000.
- [8] R. I. Issa et A. D. Gosman et A. P. Watkins, The computation of compressible and incompressible recirculating flows by a non-iterative implicit scheme, J. Comput. Phys., Volume 93, Pages 388-410, 1991.
- [9] J. López et J. Hernández et F. Faura et G. Trapaga, Shot sleeve wave dynamics in the slow phase of die casting injection, ASME Journal of Fluids Engineering, Volume 122, Pages 349-356, 2000.