

Simulation numérique par une méthode sans maillage du procédé de fabrication directe par projection laser

T. Anedaf¹, B. Abbès², F. Abbès², Y.M. Li²

¹ GRESPI, Université de Reims Champagne-Ardenne, France, tahar.anedaf@etudiant.univ-reims.fr

² GRESPI, Université de Reims Champagne-Ardenne, France, {boussad.abbes,fazilay.abbes,yuming.li}@univ-reims.fr

Résumé — Nous proposons un modèle numérique 3D pour simuler le procédé LMD (*Laser Metal Deposition*). Les équations de conservations de la masse, de la quantité de mouvement et d'énergie sont résolues par la méthode sans maillage FPM (*Finite PointSet Method*). Une condition aux limites sur la surface libre permet de simuler l'apport de matière. Pour valider l'implémentation dans le logiciel NoGrid-points, les résultats numériques obtenus ont été comparés aux données numériques et expérimentales issues de la littérature.

Mots clefs — Fabrication directe par projection laser, méthode sans maillage, fabrication additive.

1. Introduction

La fabrication additive par projection laser permet de réaliser, par ajout de matière, des pièces métalliques et des outillages. Cette technique a trouvé un créneau d'application important dans le revêtement ou la réparation des composants de grande valeur ainsi que des composants ayant subi une usure importante (réparation des aubes de turbines pour le secteur de l'aéronautique, rénovation de tiges de forage pour l'industrie offshore, réparation ou modification des outillages de moulage par injection pour l'industrie automobile par exemple). Comme pour les procédés classiques, il est nécessaire de mieux maîtriser le processus de fabrication et d'étudier l'influence des paramètres opératoires sur les caractéristiques finales des pièces et de les optimiser. La modélisation numérique a un rôle important à jouer face à ces défis, en comparaison avec son rôle dans d'autres procédés de fabrication. Le procédé de fabrication directe par projection laser implique de nombreuses interactions entre le faisceau laser, le jet de poudre et le substrat, ce qui rend complexe le développement de modèles numériques. La première simulation thermo-hydraulique de référence appliquée aux procédés additifs porte sur le traitement laser de surface avec rechargement [1] qui est une évolution du modèle thermique [2]. Han et al. [3] ont également proposé un modèle de rechargement laser d'un substrat d'acier 304L avec une poudre de même nature en utilisant la méthode Level-Set pour suivre la position de la surface libre. D'autres modèles analytiques et numériques plus complexes ont suivi [4-6]. Un modèle plus avancé a été proposé par Morville et al. [7] permet de suivre explicitement la forme dynamique de la surface libre en utilisant un maillage mobile et une méthode ALE et qui prévoit de manière réaliste la croissance d'une paroi mince. Cependant, les temps de calculs étaient trop importants ne permettant pas une utilisation à grande échelle. Récemment, Peyre et al. [8] ont proposé un modèle simplifié en n'utilisant qu'un modèle thermique avec un déplacement de la surface libre par la méthode ALE dépendant du débit massique de la poudre. Les temps de calculs sont beaucoup plus raisonnables et le modèle donne de bons résultats sauf pour la prédiction de la microstructure.

Le modèle proposé dans ce travail est basé sur la méthode sans maillage FPM (*Finite Pointset Method*) qui est une variante de la méthode SPH (*Smooth Particle Hydrodynamics*) et qui s'avère appropriée aux écoulements à surfaces libres. Les trois équations de conservation sont considérées et l'apport de matière est simulé par le mouvement des particules de la surface libre à une vitesse dépendant du débit massique de poudre.

2. Modèle numérique

2.1. La méthode FPM

La méthode FPM est l'une des méthodes sans maillage, dans laquelle les équations de conservations sont approximées sous leur forme différentielle (forme forte) à l'aide d'approximations par différences finies sans maillage. Cette méthode des particules lagrangiennes a été initialement proposée par Oñate et al. [9] pour traiter les problèmes de mécanique des fluides. La technique FPM adopte la méthode des moindres carrés mobiles (MLS : *Moving Least Squares*) [10] pour reconstruire une fonction à partir de valeurs données en un nombre fini de particules dispersées (*Pointset*), qui se déplacent avec la vitesse du fluide et transportent toutes les informations nécessaires à la discrétisation et à la résolution des équations de mécanique des fluides. L'idée est de trouver les paramètres \mathbf{a} du polynôme local $p(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i)$ qui minimise la distance $D(\mathbf{a})$ entre les valeurs aux points discrets \mathbf{x}_i et les valeurs approximées sur la fonction f (masse volumique, pression, vitesse...) tel que :

$$D(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^n w(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i) (f_i - p(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i))^2 \quad (1)$$

où la fonction de pondération $w(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i)$ est une gaussienne définie sous la forme suivante :

$$w(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i; h) = \begin{cases} \exp\left(-2 \frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^2}{h^2}\right) & \text{si } \frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|}{h} \leq 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2)$$

La taille de h définit un ensemble de points voisins autour de \mathbf{x}_i .

La méthode FPM a été utilisée efficacement pour résoudre un large éventail de problèmes d'écoulement de fluide avec surfaces libres [11-12].

2.2. Description du modèle LMD implémenté

Les équations de conservations de la masse, de la quantité de mouvement et d'énergie sont résolues par la méthode FPM :

$$\begin{aligned} \frac{d\rho(T)}{dt} + \nabla \cdot (\rho(T)\mathbf{v}) &= 0 \\ \frac{d}{dt}(\rho\mathbf{v}) &= -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{s} + \rho\mathbf{g} \\ \frac{d}{dt}(\rho(T)\bar{C}_p(T)T) &= \nabla \cdot (\lambda(T)\nabla T) \end{aligned} \quad (3)$$

où \mathbf{v} est le vecteur vitesse, $\rho(T)$ est la masse volumique dépendant de la température T , \mathbf{g} l'accélération de la pesanteur, $\mathbf{s} = \eta(T)[(\nabla\mathbf{v}) + (\nabla\mathbf{v})^T]$ est le tenseur déviateur des contraintes, $\eta(T)$ est la viscosité dépendant de la température, $\bar{C}_p(T)$ est la chaleur spécifique définie par l'équation (4) et $\lambda(T)$ est la conductivité thermique dépendant de la température.

$$\bar{C}_p(T) = C_p(T) + \frac{\Delta H_m}{\sqrt{\pi(T_L - T_s)^2}} \exp\left(-\frac{(T - T_m)^2}{(T_L - T_s)^2}\right) \quad (4)$$

où $T_m = (T_L + T_s)/2$ est la température de fusion du matériau, T_L et T_s sont respectivement les températures du Liquidus et du Solidus, et ΔH_m est la chaleur latente de fusion.

Afin d'annuler le champ de vitesse dans la phase solide, la viscosité dépend de la fraction liquide f_l telle que :

$$\begin{aligned} \eta(T) &= \eta_l(T) f_l + \eta_s (1 - f_l) \\ f_l &= 1 / (1 + \exp(-0.13(T - T_L))) \end{aligned} \quad (5)$$

où $\eta_l(T)$ est la viscosité du métal fondu et η_s est un terme de pénalisation (10^3 - 10^4).

Pour résoudre le système d'équations différentielles, des conditions initiales et aux limites sont nécessaires. Le modèle proposé ici est principalement basé sur l'hypothèse d'un mouvement de la surface libre dans la direction d'apport de matière (z) à une vitesse $V_z(x,y)$ qui dépend du débit massique effectif de poudre D_m tel que [8] :

$$V_z(x, y) = \frac{D_m}{\rho \pi R^2} \left(1 - \left(\frac{x^2}{R^2} + \frac{y^2}{R^2}\right)\right)^{1/2} \quad \text{pour } (x^2 + y^2) \leq R \quad (5)$$

où R est le rayon du jet de poudre.

Sur la surface libre, la condition aux limites thermique est donné par :

$$q = -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \frac{\alpha \cos \theta}{\pi R_0^2} P_{laser} - h_c (T - T_\infty) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4) \quad (6)$$

où P_{laser} est la puissance du faisceau laser, θ est l'angle d'incidence par rapport à la normale à la surface \mathbf{n} , R_0 est le rayon du laser, α est l'absorptivité du matériau, h_c est le coefficient d'échange convectif, ε est l'émissivité, σ est la constante de Stefan-Boltzmann et T_∞ est la température ambiante.

3. Simulation d'un dépôt mince multicouche

Pour valider l'implémentation de notre modèle, nous avons simulé un dépôt multicouche d'un Ti6Al4V sur un substrat de même nature et de dimensions : $L = 62$ mm, $h = 10$ mm et $e = 2$ mm. Une puissance laser $P_{laser} = 600$ W avec un faisceau de diamètre $D_0 = 1.7$ mm et une vitesse de balayage $V_s = 200$ mm/min ainsi qu'un débit massique en poudre $D_m = 2.5$ g/min sont utilisés. Une temporisation de 10 s entre le dépôt de deux couches successives permet de stabiliser la croissance des couches. Cet exemple a été choisi pour nous permettre une comparaison avec des résultats expérimentaux et numériques (méthode des éléments finis) issus de la littérature [8]. Les paramètres matériaux nécessaires à la simulation numérique sont issus de Boivineau et al. [13]. La Figure 1(a) montre le nuage de points, la fraction liquide et la forme du bain fondu sur la couche n°3. Nous observons une région liquide sous le centre du faisceau avec un décalage vers l'arrière du bain fondu et l'épaisseur de ce bain diminue dans la direction du balayage du faisceau laser. La Figure 1(b) montre le champ de températures obtenu par notre modèle. La forme des isothermes n'est pas symétrique par rapport au centre du faisceau en raison du déplacement du faisceau laser.

Sur la Figure 2, nous avons représenté la comparaison des profils de température simulés et mesurés expérimentalement dans la partie centrale du substrat à un emplacement de ($x = 31$ mm, $z = 3$

mm) sous la surface supérieure du substrat initial. Les cycles thermiques simulés à l'aide de la méthode FPM montrent un accord satisfaisant avec les résultats expérimentaux et les résultats numériques obtenus par Peyre et al. [8] en utilisant la méthode des éléments finis. Ces résultats montrent la validité globale de la méthode FPM pour la simulation du procédé LMD avec une légère sous-estimation des pics de températures. Des écarts sont également constatés entre notre modèle et celui de Peyre et al. [8], qui ne sont pas dus uniquement aux méthodes numériques utilisées mais également à la prise en compte de l'écoulement du fluide dans notre cas. En effet, l'écoulement dans le bain fondu améliore le brassage de celui-ci et permet de diminuer la température comparativement au calcul uniquement thermique de Peyre et al. [8] qui surestime la température.

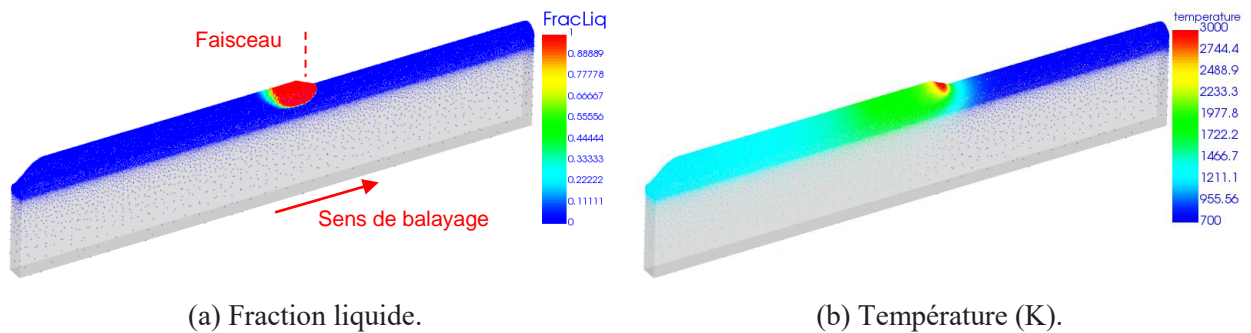


Figure 1 – Résultats du bain fondu et du champ de températures pour le dépôt de la couche n°3 avec $P_{laser} = 600$ W et $V_s = 200$ mm/min.

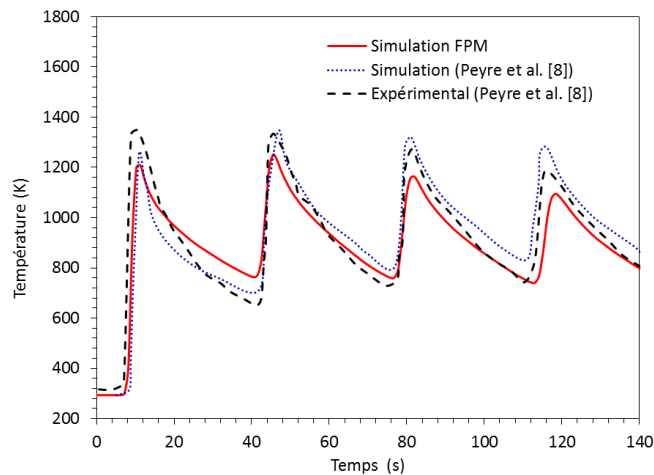


Figure 2 – Comparaison des profils de température simulés et mesurés expérimentalement dans la partie centrale du substrat à un emplacement de $(x = 31$ mm, $z = 3$ mm) sous la surface supérieure pour $P_{laser} = 600$ W et $V_s = 200$ mm/min.

4. Conclusions

Un modèle numérique 3D pour simuler le procédé LMD (*Laser Metal Deposition*) a été développé. Les équations de conservations de la masse, de la quantité de mouvement et d'énergie ont été prises en compte dans le logiciel NoGrid-points utilisant la méthode sans maillage FPM (*Finite PointSet Method*). Cette méthode permet de s'affranchir de la gestion d'un maillage (distorsion du maillage, remaillage...) et de la surface libre qui est naturellement décrite dans cette approche. Une condition

aux limites simplifiée permet de décrire l'apport de matière par le mouvement de la surface libre en considérant l'irradiation laser. Pour valider notre implémentation, les résultats numériques obtenus ont été comparés avec succès aux données numériques et expérimentales issues de la littérature.

Remerciements

Ce travail fait partie du programme de recherche «MOFASSAL» soutenu par l'Union européenne, le FEDER et la Région Grand Est. Leur soutien est fortement apprécié.

Références

- [1] M. Picasso, A.F.A. Hoadley. Finite element simulation of laser surface treatments including convection in the melt pool, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 61–83, 1994.
- [2] A.F.A. Hoadley, M. Rappaz. A thermal model of laser cladding by powder injection, *MTB*, 631–642, 1992.
- [3] Han, L., Phatak, K., Liou, F., 2004. Modeling of laser cladding with powder injection, *Metallurgical and Materials Transactions B* 35, 1139–1150.
- [4] X. He, G. Yu, J. Mazumder. Temperature and composition profile during doubletrack laser cladding of H13 tool steel, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 015502, 2010.
- [5] S.Y. Wen, Y.C. Shin. Comprehensive predictive modeling and parametric analysis of multitrack direct laser deposition processes, *Journal of Laser Applications*, 022003, 2011.
- [6] P. Peyre, P. Aubry, R. Fabbro, R. Neveu, A. Longuet. Analytical and numerical modelling of the direct metal deposition laser process, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 025403, 2008.
- [7] S. Morville, M. Carin, P. Peyre, M. Gharbi, D. Carron, P. Le Masson, R. Fabbro. 2D longitudinal modeling of heat transfer and fluid flow during multilayered direct laser metal deposition process, *Journal of Laser Applications*, 032008, 2012.
- [8] P. Peyre, M. Dal, S. Pouzet, O. Castelnaud. Simplified numerical model for the laser metal deposition additive manufacturing process, *Journal of Laser Applications*, 022304, 2017.
- [9] E. Oñate, S.R. Idelsohn, O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. A finite point method in computational mechanics to convective transport and fluid flow, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 3839–3866, 1996.
- [10] G.A. Dilts. Moving-least-squares-particle hydrodynamics—I. Consistency and stability, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1115–1155, 1999.
- [11] E. Uhlmann, R. Gerstenberger, J. Kuhnert. Cutting Simulation with the Meshfree Finite Pointset Method, *Procedia CIRP*, 391–396, 2013.
- [12] H. Abdessalam, B. Abbès, Y.M. Li, Y.Q. Guo, E. Kwassi, J.L. Romain. Parameter identification and computational simulation of polyurethane foaming process by finite pointset method, *International Journal of Material Forming*, 85–100, 2016.
- [13] M. Boivineau, C. Cagan, D. Doytier, V. Eyraud, M.-H. Nadal, B. Wilthan. Thermophysical Properties of Solid and Liquid Ti-6Al-4V (TA6V) Alloy, *International Journal of Thermophysics*, 507–529, 2006.