

Simulation de l'apport de matière durant le procédé WLAM par la méthode Arbitraire Lagrangienne-Eulérienne

Y. Jia¹, E. Feulvarch³, H. Bounghomba², L. Dubar², H. Naceur¹, J.M. Bergheau³

¹ INSA Hauts-de-France, CNRS, UMR 8201-LAMIH, F-59313, Valenciennes, {yabo.jia, hakim.naceur}@insa-hdf.fr

² Univ. Polytechnique Hauts-de-France, CNRS, UMR 8201-LAMIH, F-59313, Valenciennes, {hans.bounghomba, laurent.dubar}@uphf.fr

³ ECL-ENSIE, CNRS, UMR 5513-LTDS, F-42023 Saint-Etienne, {eric.feulvarche, jean-michel.bergheau}@enise.fr

Résumé — La fabrication additive laser avec apport de fil dite WLAM (Wire Laser Additive Manufacturing) présente plusieurs avantages dont les principaux sont une vitesse de fabrication rapide et une rentabilité élevée. Dans cet article, nous proposons d'appliquer la formulation Arbitraire Lagrangienne-Eulérienne (ALE) pour simuler l'apport de matière dans le procédé WLAM, afin de contrôler les paramètres de ce procédé. La méthode d'activation des éléments proposée dans ce travail, est basée sur une technique cinématique consistant à déplacer les noeuds de la surface d'écoulement en fonction du débit massique. Par conséquent, elle ne nécessite pas de prédéfinir la forme du cordon lors de la phase de pré-traitement. Les résultats obtenus, sont très encourageants et ont montré la pertinence de l'approche proposée.

Mots clés — WLAM, tension de surface, ALE, transfert de chaleur, apport de matière, élément finis.

1 Introduction

Le procédé de fabrication additive (FA) continue à susciter un engouement de la part des industriels et des établissements de recherche depuis la dernière décennie. En FA, le matériau est imprimé couche par couche, ce qui permet de créer des pièces de géométries complexes avec une large gamme de matériaux. Par rapport aux essais expérimentaux, la simulation numérique demeure une bonne alternative permettant de réduire les essais, elle permet également de contrôler les paramètres du procédé afin de les optimiser. Aujourd'hui, grâce au fort développement des capacités de calcul et des méthodes de résolution des problèmes multiphysiques, la simulation numérique est devenue aujourd'hui un outil incontournable en FA. On distingue alors deux modèles de simulation : le premier basé sur une modélisation multiphysique pour prendre en compte l'écoulement du bain à échelle microscopique ou mésoscopique, le deuxième basé sur une modélisation thermique permettant une estimation qualitative des quantités physiques induites à échelle macroscopique.

La modélisation multiphysique permet de prendre en compte les phénomènes de transport dans le bain de fusion et l'évolution de la surface libre ainsi que les transferts thermiques convectifs et radiatifs. Les équations de conservation (masse, énergie, quantité de mouvement) doivent être résolues à chaque pas de temps. Dans la littérature, différentes techniques telles que la méthode Arbitraire Lagrangienne-Eulérienne (ALE) [1], la méthode volume de fluide (VOF) [2] et méthode Level-Set [3], ont été appliquées pour l'estimation de la surface libre. La simulation numérique de la morphologie du bain de fusion et de la répartition de la température durant le procédé de fabrication joue un rôle important dans la compréhension des relations entre les paramètres du procédé et la qualité des pièces fabriquées. La modélisation multiphysique permet d'aboutir à une bonne estimation des états de contraintes résiduelles ainsi que la forme finale du cordon, cependant ceci au détriment d'un temps de calcul prohibitif ce qui la rend impraticable au niveau industriel.

La modélisation thermique simple consiste initialement à résoudre le problème de transfert de chaleur découplé du problème mécanique. Ici de nombreux phénomènes physiques sont simplifiés ou négligés. Le modèle transitoire pas à pas [4] et le modèle stationnaire [5] ont été utilisés pour prédire la taille du bain de fusion. Pour rendre le modèle un peu plus prédictif. Diverses contributions ont été apportées pour améliorer la prédictibilité du modèle de transfert de chaleur. Différentes formes de source de chaleur volumique ont été proposées pour prendre en compte l'effet de convection dans le bain de fusion et

l'effet multi-réflexions du laser, telle que la double ellipsoïde [6], cylindrique [7] et conique 3D [8]. Pour modéliser l'apport de matière durant la FA, les stratégies de modélisation par EF sont basées sur des travaux antérieurs développés pour le soudage multi-passes. Elles consistent en l'activation d'éléments [4] en suivant l'avancement du dépôt de matière sur un maillage correspondant à la géométrie finale. Dans cet article, une nouvelle approche thermique est proposée, basée sur la méthode EF pour simuler le procédé WLAM. Afin de remédier aux problèmes techniques d'activation des éléments durant le dépôt de fil, la méthode ALE est proposée pour simuler l'apport de matière en déplaçant les nœuds sur la surface. La tension de surface [9] a été implémentée afin de corriger la surface libre du cordon et de s'approcher des mesures expérimentales.

2 Méthodologie

La figure 1 présente une illustration du diagramme de modélisation. Pour chaque pas de temps, les étapes suivantes sont répétées : (i) avec les paramètres initiaux d'entrée, une modélisation thermique (couplée à une analyse métallurgique si besoin) est réalisée dans un premier temps pour estimer la température au nœud ; (ii) ensuite, le débit du fil est représenté par une fonction vitesse temporaire spatiale, et les nœuds surfaciques du bain de fusion sont déplacés en utilisant la vitesse de débit de fil. Au même temps, les autres nœuds du bain de fusion sont repositionnés afin d'éviter la distorsion du maille [10]. (iii) L'effet de la tension de surface dans la direction normale est pris en compte en modélisant la surface libre comme une membrane tendue avec l'hypothèse des contraintes planes. (iv) La dernière étape consiste à actualiser la géométrie du cordon, en prenant en compte le déplacement des nœuds de la surface libre et des nœuds dans le bain de fusion.

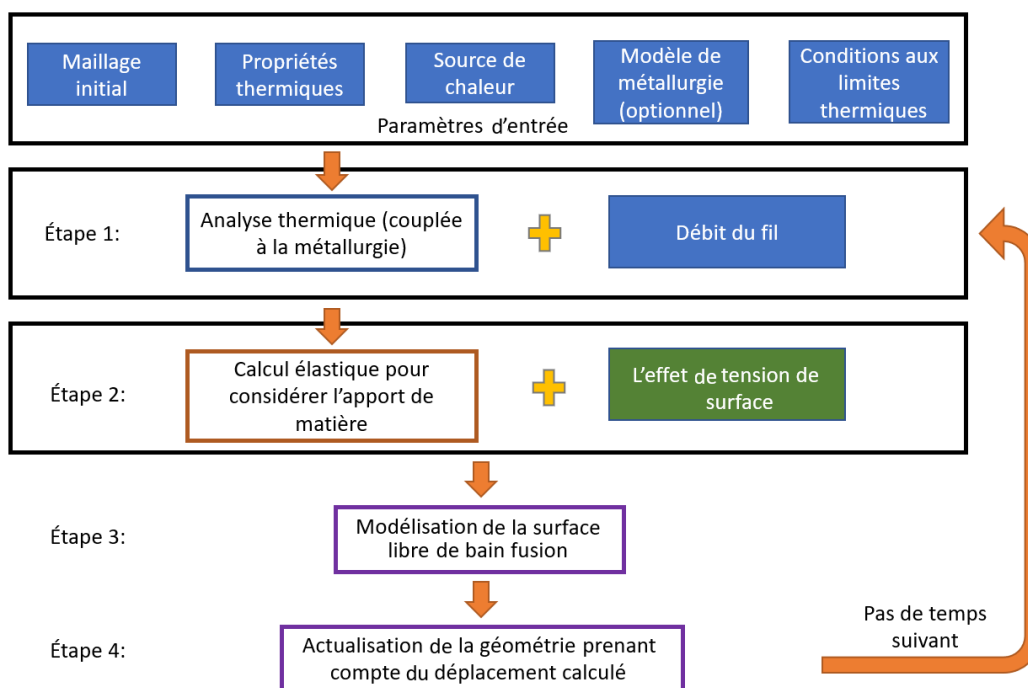


FIGURE 1 – Schéma de la méthodologie proposée

2.1 Etape 1 : simulation thermique

Les transferts de chaleur sont gouvernés dans le domaine d'étude par l'équation de la chaleur :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (1)$$

où ρ , k et c représentent respectivement la densité, la conductivité thermique et la chaleur spécifique du matériau. T est la température aux nœuds, et Q est une fonction décrivant la source de chaleur due à

l'interaction laser et matière. La technique de conductivité anisotrope peut être appliquée afin de simuler les effets de convection dans le bain de fusion.

Les pertes convectives q_c et radiatives q_r sont prises en compte par les conditions aux limites qui s'écrivent sur la frontière du domaine d'étude comme suit :

$$\begin{aligned} q_c &= h_c (T - T_\infty) \\ q_r &= \sigma \varepsilon (T^4 - T_\infty^4) \end{aligned} \quad (2)$$

où T_∞ est la température du milieu ambiant, h_c est le coefficient d'échange avec l'air ambiant, σ représente la constante de Stefan-Boltzmann et ε l'émissivité de surface.

Cependant, le volume du fil déposé est modélisé par l'augmentation du volume du bain fondu, et la température du fil est considérée comme ayant la même température que le bain fondu. Cette simplification risque de surestimer l'enthalpie dans le bain de fusion (voir section 3), et donc les dimensions du bain de fusion sont susceptibles d'être surestimées.

Pour corriger cette surestimation, un échange thermique est imposé aux éléments de peau, où on dépose le fil. La perte de chaleur s'écrit :

$$q_{fil} = \rho c V_{fil} (T_{fil} - T_{peau}) \quad (3)$$

où ρ est la densité du matériau du fil à température ambiante, V_{fil} est la vitesse de déposition du fil, T_{fil} est la température initiale du fil (température ambiante) et T_{peau} la température de la surface libre.

2.2 Etape 2 : calcul élastique

Selon la température moyenne des éléments, ces derniers peuvent être classés en éléments fluides et en éléments solides par rapport à la température de fusion (figure 2). Pour assurer la bonne qualité de maillage, les nœuds fluides dans le bain de fusion vont être également repositionnés [10].

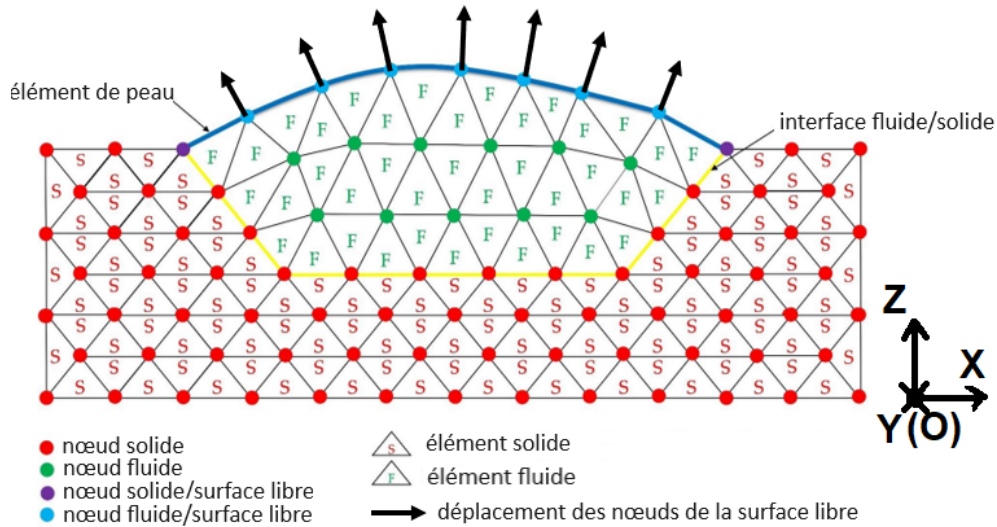


FIGURE 2 – Calcul élastique pour prendre en compte le dépôt de fil.

La vitesse imposée au nœud de la surface libre, qui sont dans la zone de déposition, est déterminé par :

$$\mathbf{V}_m(t) = N V_{fil} e^{\left(\frac{-N((x-x_{centre})^2+(y-y_{centre})^2)}{r_p^2}\right)} \mathbf{z} \quad (4)$$

où N est le facteur de distribution gaussienne et \mathbf{z} est le vecteur unitaire dans la direction normale des éléments de peau. r_p est correspondant à la radius du fil. (x_{centre}, y_{centre}) est la centre position du fil. (x, y) sont les coordonnées du nœud qui va être déplacée.

2.3 Etape 3 : modélisation de la surface libre

Le calcul précédent permet de prendre en compte l'apport de matière dans le bain de fusion, qui donne la forme initiale du cordon. L'application des forces de tension de surface permettra de corriger la forme du cordon. Feulvrach *et al.* [9] ont étudié cette possibilité et l'avaient validé par comparaison à des mesures expérimentale et ont ainsi montré son efficacité.

2.4 Etape 4 : Actualisation de la géométrie

La dernière étape concerne l'actualisation de la géométrie. Les positions des nœuds sont recalculés en prenant en compte les déplacements donnés aux étapes 2 et 3. La nouvelle géométrie sera utilisée comme configuration initiale pour le pas de temps suivant.

3 Application numérique

Le logiciel SYSWELD [11] a été utilisé pour la modélisation du procédé WLAM. Le substrat et le fil sont en acier 316L et les propriétés du matériau sont données dans la documentation de SYSWELD [11]. Les dimensions du substrat sont $10 \times 4 \times 2.5\text{mm}$ avec un diamètre de fil de 1mm . La vitesse d'avance du laser et du fil est la même de 10mm/s . La vitesse de dépôt du fil est 1.5mm/s . L'énergie de distribution du laser est supposée représentée par une distribution gaussienne 2D [5].

La condition de symétrie a été appliquée pour réduire la taille du modèle et on suppose un échange thermique de toutes les surfaces externes avec l'air ambiant. Le modèle CAE consiste en un maillage en éléments tétraédriques comme indiqué sur la Figure 3.

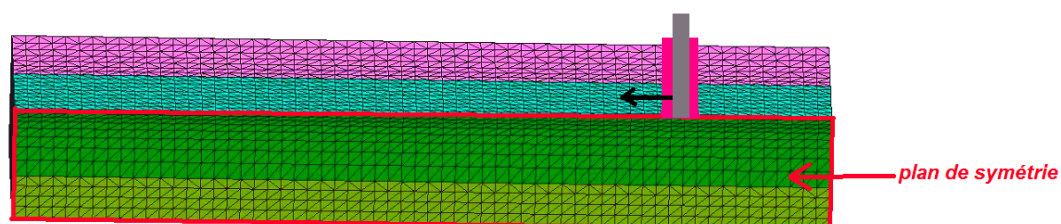


FIGURE 3 – Schéma de principe du procédé et le maillage initial.

La figure 4 présente les cartes de distribution de température obtenues par calcul sans et avec correction par l'équation 3. Cette correction montre un effet significatif au niveau de la prédiction du bain de fusion. Des essais expérimentaux seront nécessaires afin de valider cette proposition.

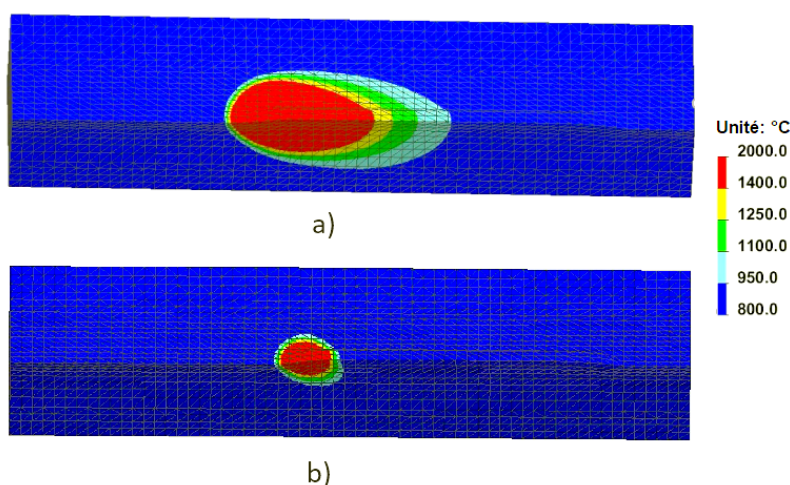


FIGURE 4 – Température simulées sans (a) et avec (b) la correction par l'équation 3.

La forme du cordon présenté dans le figure 4 n'a pas encore été corrigée par les forces de tension de surface. La figure 5 montre le profil du cordon après la correction en introduisant les forces de tension de

surface (courbe en violet). A ce stade de développement, le calcul de la correction se fait sur les éléments de la peau du cordon. Dans la suite des travaux, un calcul élastique de correction des éléments interne du cordon, sera fait pour prendre en compte la nouvelle surface.

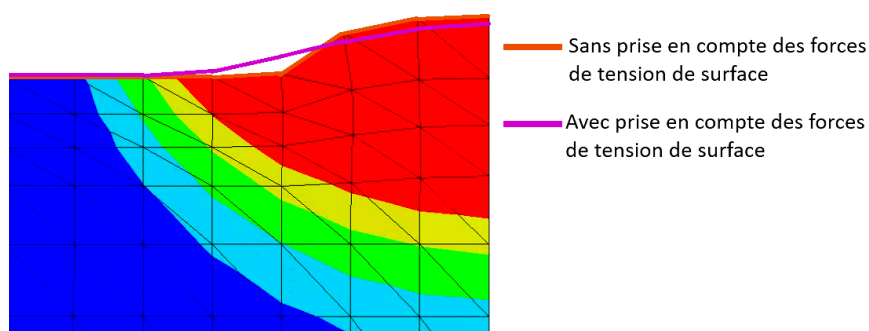


FIGURE 5 – Profile de peau du cordon sans et avec prise en compte des effets de tension de surface.

4 Conclusion

Cet article propose une nouvelle technique pour simuler les dimensions du bain de fusion et prédire la forme du cordon en FA de type WLAM. Des essais expérimentaux sont en cours pour vérifier les résultats obtenus par le modèle proposé.

Références

- [1] C. Hirt, A. Amsden, J. Cook, *An arbitrary lagrangian-eulerian computing method for all flow speeds*, Journal of Computational Physics 14 (3) (1974) 227–253.
- [2] C. Hirt, B. Nichols, *Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries*, Journal of Computational Physics 39 (1) (1981) 201–225.
- [3] S. Osher, J. A. Sethian, *Fronts propagating with curvature-dependent speed : Algorithms based on hamilton-jacobi formulations*, Journal of Computational Physics 79 (1) (1988) 12–49.
- [4] P. Michaleris, *Modeling metal deposition in heat transfer analyses of additive manufacturing processes*, Finite Elements in Analysis and Design 86 (2014) 51–60.
- [5] Y. Jia, Y. Saadlaoui, J.-C. Roux, J.-M. Bergheau, *Steady state thermal model based on new dedicated boundary conditions – application in the simulation of laser powder bed fusion process*, Applied Mathematical Modelling 112 (2022) 749–766.
- [6] J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby, *A new finite element model for welding heat sources*, Metallurgical transactions B 15 (1984) 299–305.
- [7] Q. Chen, G. Guillemot, C.-A. GANDIN, M. Bellet, *Numerical modelling of the impact of energy distribution and marangoni surface tension on track shape in selective laser melting of ceramic material*, additive manufacturing 21 (2018) 713-723 21 (2018) 713–723.
- [8] Y. Jia, Y. Saadlaoui, J.-M. Bergheau, *A temperature-dependent heat source for simulating deep penetration in selective laser melting process*, Applied Sciences 11 (23) (2021).
- [9] E. Feulvarch, F. Josse, J.-C. Roux, A. Sova, *An efficient reduced-physics-coupling FEM formulation for simulating a molten metal deposition geometry*, European Journal of Mechanics - A/Solids (2021). doi : 10.1016/j.euromechsol.2021.104290
- [10] Y. Saadlaoui, E. Feulvarch, A. Delache, J.-B. Leblond, J.-M. Bergheau, *A new strategy for the numerical modeling of a weld pool*, Comptes Rendus Mécanique 346 (11) (2018) 999–1017, computational methods in welding and additive manufacturing Simulation numérique des procédés de soudage et fabrication additive. doi :<https://doi.org/10.1016/j.crme.2018.08.007>
- [11] Software SYSWELD Version 2021 ; ESI-Group : Lyon, France, 2021