

Nouvelle approche numérique de la tension de surface pour la simulation numérique des procédés DED

F. Josse¹, A. Rassineux², A. Sova¹, J.-C. Roux¹, E. Feulvarch¹

¹ Univ. Lyon, ECL-ENISE, LTDS, UMR 5513 CNRS, 58 rue Jean Parot, 42023 Saint-Etienne cedex 02, France, {francois.josse, alexey.sova, jean-christophe.roux, eric.feulvarch}@enise.fr

² Laboratoire Roberval, Univ. de technologie de Compiègne, Centre de recherche Royallieu, CS 60319, 60203 Compiègne Cedex, France, alain.rassineux@utc.fr

Résumé — Les procédés de fabrication additive par DED sont destinés à la production de pièces de grandes dimensions. La géométrie finale des pièces produites est directement dépendante de la forme du cordon de matière ajouté à chaque couche. Dans ce travail, une nouvelle formulation est proposée en supposant que la géométrie du dépôt est essentiellement déterminée par l'effet normal de la tension de surface du bain liquide. Cette approche présente l'intérêt de prédire la géométrie des cordons déposés avec un temps de calcul réduit. D'autre part, elle permet de suivre l'évolution géométrique d'une pièce 3D à l'aide d'un algorithme de remaillage. À partir de l'évolution géométrique de la pièce 3D, il est possible de réaliser un calcul thermomécanique pour anticiper l'évolution des distorsions induites par le procédé.

Mots clés — Fabrication Additive, DED, Tension de surface, Couplage multiphysique, Remaillage.

1 Introduction

La fabrication additive par procédés Direct Energy Deposition (DED) permet de construire des pièces de dimensions métriques en déposant localement la matière nécessaire à la géométrie finale. Les différentes technologies appartenant à la famille DED consistent à fusionner un métal d'apport (poudre ou fil) avec une source de chaleur locale (arc électrique, laser, faisceau d'électrons) pour former un cordon de matière similaire au soudage. À l'heure actuelle, de nombreuses étapes expérimentales amont à la production sont encore nécessaires afin d'assurer l'obtention et la stabilité de la géométrie de cordon désirée. De plus les procédés DED sont encore peu maîtrisés et souvent confrontés aux verrous liés à la prédiction de la géométrie finale.

Diverses stratégies de simulation ont été développées pour modéliser les phénomènes intervenant dans les procédés additifs de type DED. Ces stratégies ne permettent pas actuellement de prédire à la fois la géométrie du cordon à l'échelle mésoscopique et les distorsions de la pièce à l'échelle macroscopique dans un unique modèle. Les modèles permettant la prédiction de la géométrie du bain fondu et les phénomènes à l'échelle mésoscopique sont en général des modèles prenant en compte les phénomènes hydro-dynamiques dans le bain de fusion [1, 2]. Ces modèles sont extrêmement complexes et ne permettent pas de prédire la géométrie de l'intégralité d'un dépôt de matière.

Les modèles de simulation des procédés DED à l'échelle macroscopique se basent sur des stratégies de simulation issues du soudage. Ils nécessitent de créer un maillage correspondant à la géométrie finale de la pièce produite, étape demandant beaucoup de temps et entraînant de nombreuses hypothèses. Pour représenter l'ajout de matière couche par couche, les éléments finis sont activés progressivement [3, 4]. Les propriétés des éléments inactifs doivent permettre de représenter les transferts de chaleur entre la partie active et l'air environnant. L'activation des éléments se produit lorsque la température dépasse une valeur critique. Les propriétés des éléments activés deviennent celles de la matière déposée. Cette stratégie de simulation permet d'estimer les distorsions induites par le procédé dans des temps de calcul cohérents avec les besoins industriels, mais ne permet pas de prédire la géométrie finale qui doit être connue a priori. De plus, les méthodes issues du soudage représentent difficilement la transition entre la

dissipation thermique par conduction vers un mode de dissipation par convection.

Dans ce travail, une nouvelle stratégie FEM avec remaillage est proposée pour simuler la géométrie finale d'une pièce produite par DED. Cette approche suppose que la géométrie du dépôt est essentiellement déterminée par l'effet normal de la tension de surface du bain liquide. Elle présente l'intérêt de s'affranchir de la simulation du bain de fusion et de présenter des temps de calcul réduits. Le remaillage nécessaire à la conservation d'un facteur d'élément satisfaisant est conduit sur des éléments tétraédrique et triangulaire. Cela permet de réduire considérablement le temps de calcul pour cette opération.

La nouvelle formulation peut être utilisée comme un outil type FAO permettant la réduction du nombre d'essais amont à l'industrialisation en offrant la possibilité de prédire la géométrie des cordons en fonction des paramètres machine. Cette formulation couplée à une simulation thermomécanique a pour but de prédire intégralement la géométrie d'une pièce produite par Laser Metal Deposition (LMD).

2 Formulation

2.1 Effet de courbure de la tension de surface

Dans ce travail, la modélisation se focalise sur l'effet de courbure de la tension de surface au niveau de la surface libre S du bain de fusion [5]. De façon générale, les effets de la tension superficielle sont équivalents à ceux d'une membrane étanche collée à la surface du bain de fusion. Comme le montre la figure 1, la membrane étanche est soumise à une pression différentielle notée Δp ($= p_{bain} - p_{air}$) et l'effet de la tension superficielle γ associée à la courbure.

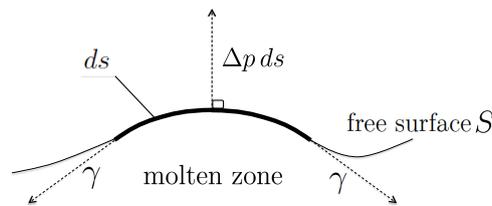


FIGURE 1 – Schématisation de l'effet de courbure de la tension de surface [5].

p_{bain} n'est pas calculé à partir du débit de fluide dans le bain de fusion comme cela semblerait naturel. Cette pression est supposée être quasiment constante tout comme p_{air} . Cela repose sur 3 hypothèses :

- Les phénomènes visqueux peuvent être négligés en raison de la valeur élevée du nombre de Reynolds. Par exemple, les travaux de Saadlaoui *et al.* [1] dans le cas d'un acier inoxydable conduisent à une valeur du nombre de Reynolds supérieure à 10^3 .
- L'influence de la gravité sur la pression est négligeable du fait des faibles dimensions de la zone fondue qui ne dépassent pas quelques millimètres.
- En considérant un état quasistationnaire dans le repère lié à la vitesse d'avancement du dépôt [6], l'équation de Bernoulli indique que l'énergie cinétique par unité de volume n'évolue pas significativement dans la zone fondue.

De fait, la pression différentielle Δp peut être supposée connue et constante sur toute la surface de la zone fondue. Comme le montre la figure 1, sa valeur doit permettre de respecter l'équilibre mécanique local qui dépend de la tension superficielle et surtout, de la courbure locale de la surface. Dans cette approche, l'influence de l'effet Marangoni liée aux variations spatiales de la tension superficielle sur la surface n'est pas prise en compte. Ce phénomène nécessite de connaître la vitesse du fluide qui n'est pas calculée.

2.2 Formulation faible

En se basant sur les travaux de Leblond *et al.* [7], la formulation proposée intègre les effets de tension de surface via des éléments finis 2D de type membrane dans lesquels l'état de contrainte est défini par le

tenseur σ :

$$\sigma = \gamma I \quad (1)$$

avec I qui correspond au tenseur unité $2D$ dans le plan des éléments. La puissance virtuelle des forces internes \mathcal{P}_{int} peut s'écrire de la manière suivante :

$$\mathcal{P}_{int} = - \int_S \mathbf{D}(\delta \mathbf{v}) : \sigma ds \quad (2)$$

où \mathbf{D} est la partie symétrique du gradient de la vitesse virtuelle $\delta \mathbf{v}$ de la membrane S correspondant à la surface du bain de fusion.

La puissance virtuelle des forces externes \mathcal{P}_{ext} est définie comme suit :

$$\mathcal{P}_{ext} = \int_S \delta \mathbf{v} \mathbf{T} ds \quad (3)$$

avec \mathbf{T} qui représente le vecteur contrainte dépendant de la pression différentielle Δp :

$$\mathbf{T} \mathbf{n} = \Delta p \quad (4)$$

La formulation faible du problème à traiter permettant de modéliser la géométrie du cordon en cours de dépôt est obtenue en appliquant le principe des puissances virtuelles et en intégrant l'équation (4) sur la membrane S après l'avoir multipliée par la fonction δp .

$$\begin{aligned} \forall \delta \mathbf{v}, \int_S \delta \mathbf{v} \mathbf{T} ds - \int_S \mathbf{D}(\delta \mathbf{v}) : \sigma ds &= 0 \\ \forall \delta p, \int_S \delta p \mathbf{T} \mathbf{n} ds - \int_S \delta p \Delta p ds &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

3 Application au Laser Metal Deposition avec remaillage

La nouvelle formulation présentée précédemment sera appliquée au procédé Laser Metal Deposition (LMD) afin de prédire la géométrie des cordons en fonction des paramètres machine et les distorsions issues du cyclage thermique. La stratégie numérique à chaque pas de temps se décompose entre une phase de simulation de la géométrie du cordon à l'aide de la formulation présentée ci-dessus ainsi qu'un remaillage lorsque nécessaire, ensuite une simulation thermomécanique sur le maillage à jour est réalisée. Le modèle est composé d'une plaque substrat de 300x200mm épaisseur 8mm à laquelle est appliqué les propriétés thermomécanique du 316L. La face inférieure de la plaque est bridée pour simuler le bridage à un martyr. Le modèle est composé d'éléments tétraédriques linéaires standards ayant une taille comprise entre 400 μ m dans la zone de dépôt et 5000 μ m dans le substrat. L'utilisation d'éléments standards tétraédriques permet de réaliser le maillage du substrat avec un mailleur automatique, permettant de réduire le temps nécessaire à la préparation du calcul.

La phase de remaillage est nécessaire afin de limiter la déformation des éléments triangulaires de peau et des éléments tétraédriques du volume après la simulation de plusieurs couches successives. Ce remaillage intervient dans la stratégie numérique après avoir fait croître le cordon sur la surface, il est appliqué à l'ensemble des éléments du substrat et permet de conserver une qualité de maillage satisfaisante au cours du calcul.

La source de chaleur équivalente représentant le laser appliquée au modèle est formée par deux composantes, une première source volumique double ellipsoïdale et une source gaussienne surfacique. Les paramètres de la source de chaleur sont calés à partir d'essais représentatifs en comparant la taille de bain et des mesures par thermocouple. Les échanges thermiques avec l'extérieur définis par l'équation 6 se composent des échanges avec le martyr (7) et des échanges avec l'air répartis entre la convection (8) et la radiation (9).

$$\Phi_{total} = \Phi_{martyr} + \Phi_{convection} + \Phi_{radiation} \quad (6)$$

Avec pour les échanges thermiques du substrat avec le martyr imposés sur la face inférieure du substrat :

$$\phi_{martyr} = h_m(T - T_0) \quad (7)$$

Et les échanges thermiques à l'air imposés aux autres faces du modèle :

$$\phi_{convection} = h_c(T - T_0) \quad (8)$$

$$\phi_{radiation} = \epsilon\sigma_0(T^4 - T_0^4) \quad (9)$$

L'équation de la chaleur se présente alors comme suit :

$$\rho Cp \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right) = \mathbf{div}(\lambda \cdot \mathbf{grad} \theta) + Q \quad (10)$$

Avec ρ la masse volumique du 316L, Cp la chaleur spécifique et λ la conductivité thermique. Q représente la source volumique de chaleur équivalente au laser.

La résolution de la thermique et de la mécanique à chaque pas de temps avec un couplage fort permet de prendre en compte l'influence de la distorsion sur la géométrie ainsi que sur la position réelle de la source de chaleur. Cette approche permet d'être plus fidèle aux conditions aux limites et de mieux représenter la transition de mode de dissipation thermique par conduction vers une dissipation par convection au cours de la construction d'une pièce 3D. Cette stratégie de simulation complète permet de prédire à la fois l'état de distorsion à l'échelle macroscopique par la thermomécanique et la géométrie du cordon de matière à l'échelle mésoscopique via la formulation proposée.

4 Références bibliographiques

Références

- [1] Yassine Saadlaoui. Simulation numérique des procédés thermomécaniques dans une approche couplant les écoulements du fluide avec les déformations du solide : application au soudage laser et à la fusion d'un lit de poudre. 2019.
- [2] Stephen Cadiou, Mickael Courtois, Muriel Carin, W. Berckmans, and Philippe Le Masson. 3d heat transfer, fluid flow and electromagnetic model for cold metal transfer wire arc additive manufacturing (cmt-waam). *Additive Manufacturing*, 36 :101541, 08 2020.
- [3] Panagiotis Michaleris. Modeling metal deposition in heat transfer analyses of additive manufacturing processes. *Finite Elements in Analysis and Design*, 86 :51–60, 2014.
- [4] Michele Chiumenti, Xin Lin, Miguel Cervera, Lei Wei, Yuxiang Zheng, and Weidong Huang. Numerical simulation and experimental calibration of additive manufacturing by blown powder technology. part i : Thermal analysis. *Rapid Prototyping Journal*, 23 :448–463, 03 2017.
- [5] Eric Feulvarch, François Josse, Jean Christophe Roux, and Alexey Sova. An efficient reduced-physics-coupling FEM formulation for simulating a molten metal deposition geometry. *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 89(February) :104290, 2021.
- [6] Sylvain Rabier and Marc Medale. Computation of free surface flows with a projection fem in a moving mesh framework. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 192(41) :4703–4721, 2003.
- [7] Jean-Baptiste Leblond, Hussein Amin El Sayed, and Jean-Michel Bergheau. On the incorporation of surface tension in finite-element calculations. *Comptes Rendus Mécanique*, 341(11) :770–775, 2013.