

Calibrage et validation morphologique d'un modèle éléments finis pour la fabrication additive GMAW-CMT

G.Dutriévoz^{1,2}, Y.Saadlaoui¹, J.C.Roux¹, P.Bocher², E.Feulvarch¹

¹ Université de Lyon, École Centrale de Lyon, LTDS, UMR 5513 CNRS, 58 Rue Jean Parot, Saint-Étienne 42023, France

² École De Technologie Supérieure ÉTS, 1100 Rue Notre Dame O, Montréal QC H3C 1K3, Québec, Canada

philippe.bocher@etsmtl.ca

gabin.dutriévoz, yassine.saadlaoui, jean-christophe.roux, eric.feulvarch@enise.ec-lyon.fr

Résumé — Cette étude valide un nouveau modèle éléments finis de membrane pour prédire la géométrie des dépôts métalliques. Il s'appuie sur une formulation variationnelle via le principe des puissances virtuelles, introduisant un terme de surpression dépendant linéairement de l'altitude (paramètre β^*) pour capturer implicitement les effets hydrodynamiques sans résoudre les équations de fluides. Une méthode d'identification inverse calibre ce paramètre et le flux de matière, ηq , à partir de profils expérimentaux GMAW-CMT. Les résultats confirment la précision du modèle pour un coût de calcul réduit.

Mots clés — Fabrication additive, GMAW-CMT, Modèle réduit, Éléments finis, Membrane, Calibrage, Géométrie.

1 Introduction

La maîtrise des géométries de dépôts métalliques dans les procédés de fabrication additive garantit la qualité et la fiabilité des pièces finales. Ces dépôts forment des cordons dont la morphologie est le résultat d'une interaction complexe de phénomènes thermo-hydrodynamiques au sein du bain de fusion qui sont principalement gouvernés par la convection de Marangoni et les forces de tension superficielle [2, 9]. La prédiction et le contrôle de cette géométrie sont donc déterminants pour assurer la précision dimensionnelle, prévenir les défauts tels que le manque de fusion ou les surépaisseurs, et optimiser les trajectoires de dépôt [8].

Les modèles numériques multiphysiques, principalement basés sur la mécanique des fluides (CFD), capturent avec précision la dynamique du bain fondu. Cependant, leur coût de calcul élevé, imposé par des maillages fins et des pas de temps courts, limite leur application à des simulations à l'échelle locale [6]. Pour y remédier, Jia et al. optimisent ce type de simulations en restreignant la résolution des équations à une zone mobile autour du bain de fusion [5]. D'autres approches à physique réduite s'affranchissent de la résolution de l'écoulement en calculant la forme du cordon directement à partir des lois de la capillarité [7]. Enfin, les approches par apprentissage automatique relient les paramètres du procédé aux dimensions du cordon mais leur capacité de généralisation reste conditionnée par la diversité de la base de données d'entraînement [1, 10].

Parmi les approches à physique réduite, la modélisation de la surface libre du bain fondu comme une membrane tendue apparaît comme une voie prometteuse. L'avantage majeur de cette méthode est de remplacer la résolution complexe des écoulements et le calcul de la courbure de surface par un équilibre mécanique plus simple. Feulvarch et al. [3, 4] ont récemment développé une approche de ce type pour la fabrication additive multi-couches grâce à un nouvel élément fini de membrane. La méthode permet de simuler des géométries 3D complexes avec des coûts de calcul très faibles. Cependant, cette approche repose sur deux paramètres qui nécessitent un calibrage basé sur des données expérimentales.

Dans ce contexte, cette étude propose une méthodologie de validation et de calibrage du modèle éléments finis de membrane. Les deux paramètres clés du modèle, le flux de volume effectif ηq et le paramètre de forme β^* sont identifiés à partir de l'observation expérimentale de cordons fabriqués

dans différentes configurations. Ce travail apporte deux contributions majeures : (i) le développement d'une méthodologie de calibrage qui utilise la morphologie complète du cordon pour un ajustement précis des paramètres et (ii) la validation de l'approche proposée sur un ensemble varié de configurations expérimentales. L'étude s'organise comme suit : la Section 2 détaille la méthodologie expérimentale, la Section 3 présente le modèle numérique et la stratégie de calibrage associée et la Section 4 analyse les premiers résultats.

2 Méthodologie Expérimentale

2.1 Élaboration des Cordons de Soudure

Le procédé GMAW-CMT (Gas Metal Arc Welding - Cold Metal Transfer) a été utilisé pour réaliser les cordons de soudure de cette étude. Un fil d'acier carbone ER70S6 a été déposé sur un substrat en acier ASTM A36 sous un mélange gazeux (Ar-CO₂). Afin d'étudier l'influence des paramètres sur la géométrie des dépôts, un plan expérimental a été défini en faisant varier la vitesse de dévidage du fil et la vitesse de déplacement. Pour chaque combinaison de paramètres, trois échantillons ont été produits afin d'assurer la répétabilité des mesures. Les sections ont ensuite été caractérisées par macrographie.

2.2 Caractérisation Géométrique des Profils

L'extraction des profils géométriques est réalisée en trois étapes principales par un protocole automatisé sous MATLAB. Ce processus débute par une phase de pré-traitement de l'image combinant filtrage et binarisation pour isoler avec précision le contour du dépôt. Les coordonnées extraites sont recalées par un alignement du sommet du profil sur l'axe vertical ($x = 0$). Cette procédure d'extraction et de standardisation est illustrée à la Figure 1.

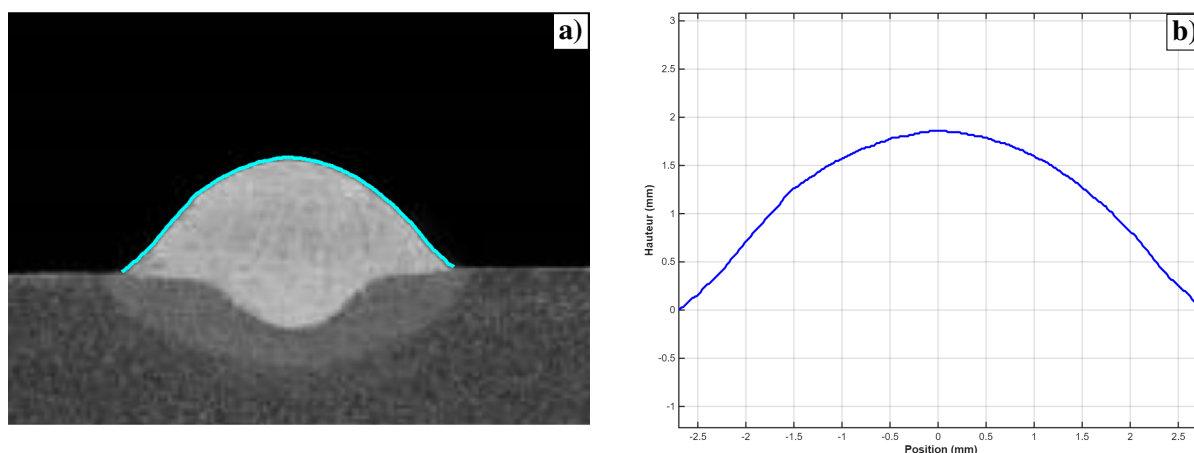


Figure 1: Processus d'extraction et de standardisation du profil géométrique du cordon : (a) superposition du profil extrait sur la macrographie expérimentale et (b) profil géométrique extrait.

3 Modèle Numérique et Stratégie de Calibrage

3.1 Présentation du modèle de membrane fictive

Le modèle numérique de cette étude repose sur les travaux de Feulvarch et al. [4]. Cette approche simule la géométrie du dépôt en modélisant l'évolution de la surface libre du bain fondu comme une membrane. Ce modèle à physique réduite permet de s'affranchir de la résolution coûteuse des équations de la mécanique des fluides en se basant sur un maillage surfacique 2D. La géométrie de cette membrane est déterminée à chaque pas de temps en appliquant le principe des puissances virtuelles qui établit l'équilibre

entre la puissance des efforts extérieurs de surpression Δp et celle des efforts intérieurs de tension de surface γ :

$$\forall \delta \mathbf{v}, \quad \int_S \delta \mathbf{v} \cdot (\Delta p \vec{n}) dS - \int_S \delta \mathbf{D} : (\mathbf{I} \gamma) dS = 0 \quad (1)$$

où $\delta \mathbf{v}$ est un champ de vitesse virtuelle, \vec{n} la normale à la surface S et $\delta \mathbf{D}$ le tenseur des taux de déformation de surface. L'originalité de l'approche réside dans la formulation de la surpression Δp qui est supposée varier linéairement selon l'axe vertical z pour tenir compte de l'hydrodynamique du bain de fusion :

$$\Delta p = \bar{\Delta p} + \beta z \quad (2)$$

Dans l'algorithme de résolution, le paramètre de surpression moyen $\bar{\Delta p}$ est ajusté itérativement pour satisfaire l'équilibre mécanique tout en conservant le volume de matière ajouté. La prédiction géométrique du modèle repose ainsi sur 2 paramètres clés qui doivent être calibrés à partir de données expérimentales :

1. Le flux de volume effectif, ηq : ce paramètre contrôle l'apport de matière dans le bain de fusion à chaque pas de temps et détermine directement le volume final du cordon.
2. Le paramètre de forme normalisé, $\beta^* = \beta/\gamma$: ce terme ajuste la distribution de la surpression sur la hauteur du bain fondu en imposant un gradient vertical constant pour corriger la géométrie de la surface libre. Il reproduit les effets des phénomènes hydrodynamiques (Marangoni et flottabilité) sur la courbure de la surface et donc sur la morphologie du cordon. Une valeur positive ($\beta^* > 0$) favorise un cordon plus haut et bombé, tandis qu'une valeur négative ($\beta^* < 0$) tend à aplatir et élargir le cordon (voir Figure 2).

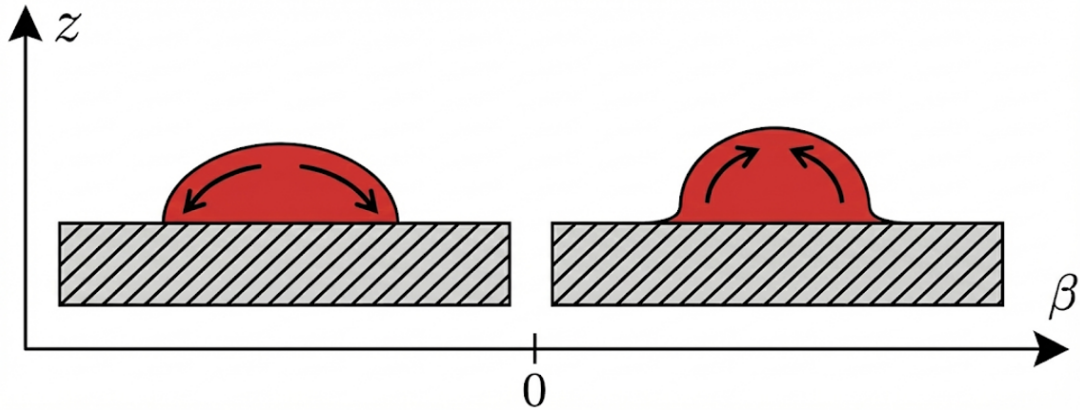


Figure 2: Influence du β sur la forme transversale d'un dépôt métallique

Le calibrage de ces deux paramètres, ηq et β^* , est donc indispensable pour assurer que le modèle puisse reproduire fidèlement la morphologie des dépôts expérimentaux.

3.2 Procédure de calibrage et métriques d'évaluation

Le calibrage des paramètres du modèle, ηq et β^* , est réalisé au moyen d'une procédure d'optimisation automatisée visant à minimiser l'écart morphologique entre le profil transversal simulé et le profil expérimental. Pour initialiser la simulation, une première estimation de ηq est obtenue en appliquant le principe de conservation de la matière, selon la relation :

$$\eta q \approx \frac{A \cdot v_a}{\pi R^2} \quad (3)$$

où A est l'aire de la section transversale mesurée sur la macrographie, v_a la vitesse de soudage et R le rayon de la source de chaleur. L'optimisation se concentre ensuite sur le paramètre β^* . L'écart résiduel est quantifié par l'Erreur Quadratique Moyenne (RMSE) basée sur la distance Euclidienne. Cette méthode calcule la distance minimale entre chaque point expérimental $P_{\text{exp},i}$ et le point le plus proche appartenant à la courbe simulée P_{sim} . Pour un ensemble de N points expérimentaux, la métrique est définie par :

$$E_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \min_j \|\mathbf{P}_{exp,i} - \mathbf{P}_{sim,j}\|^2} \quad (4)$$

où $\|\cdot\|$ représente la norme Euclidienne dans le plan (x, z) . Le couple optimal $(\eta q, \beta^*)$ retenu est celui qui minimise cette distance E_{RMSE} .

4 Résultats

Afin de valider la performance du modèle, la méthodologie de calibrage est illustrée à travers un cas d'étude représentatif. Cette démarche vise à évaluer la capacité de l'outil numérique à reproduire avec précision la morphologie des dépôts expérimentaux. Dans cette configuration, l'analyse a conduit au couple de paramètres optimal $(\eta q, \beta^*)$ suivant :

1. Le flux de volume effectif ηq a été identifié à 3.16 mm.s^{-1} .
2. Le paramètre de forme normalisé β^* a été déterminé à 0.15 mm^{-2} . La valeur positive obtenue ($\beta^* > 0$) indique une augmentation de la pression interne avec l'altitude z . Par rapport à la géométrie de référence ($\beta^* = 0$), cela se traduit par une augmentation de la courbure de la surface libre ce qui résulte d'un cordon plus haut et plus bombé.

La superposition du profil expérimental et du profil simulé obtenu avec ces paramètres est illustrée sur la Figure 3.

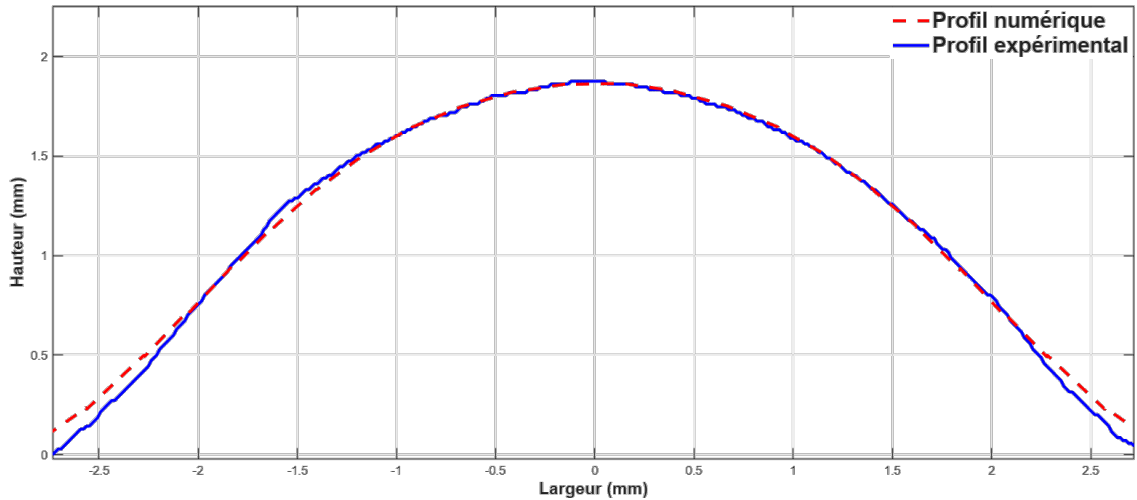


Figure 3: Superposition du profil expérimental et du profil numérique après calibrage des paramètres optimaux ($\eta q = 3.16 \text{ mm.s}^{-1}$, $\beta^* = 0.15 \text{ mm}^{-2}$).

Une excellente concordance est observée entre la simulation et l'expérience sur la quasi-totalité du profil. L'analyse quantitative confirme cet accord :

- Le modèle prédit la hauteur maximale avec une excellente précision, présentant un écart relatif inférieur à 0.3% par rapport à l'expérimental.
- L'erreur morphologique globale, quantifiée par le critère E_{RMSE} (Eq. 4), est de 0.035 mm. La courbure et l'étalement du dépôt sont fidèlement capturés par le modèle.
- On note néanmoins une divergence locale au pied de cordon. Le modèle tend à sous-estimer l'angle de mouillage (calculé $< 27^\circ$) par rapport à la réalité (mesuré $\sim 40^\circ$).

Ces résultats valident la double contribution de cette étude. D'une part, ils démontrent l'efficacité de la méthodologie de calibrage inverse (contribution (i)) qui utilise la morphologie complète pour identifier

précisément les paramètres physiques. D'autre part, ils confirment la capacité prédictive du modèle de membrane fictive (contribution (ii)) qui reproduit avec une grande précision la géométrie finale du cordon malgré son approche à physique réduite. Les résultats obtenus sur l'ensemble des configurations étudiées (non détaillées ici) présentent des niveaux de précision comparables.

References

- [1] Akbari P., Ogoke F., Kao N., Meidani K., Yeh C., Lee W., and Farimani A. B. MeltpoolNet : Melt pool characteristic prediction in Metal Additive Manufacturing using machine learning. *Additive Manufacturing*, 55 :102817, 2022.
- [2] DebRoy T., Wei H., Zuback J., Mukherjee T., Elmer J., Milewski J., Beese A., Wilson-Heid A., De A., and Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress In Materials Science*, 92 :112–224, 2017.
- [3] Feulvarch E., Josse F., Roux J., and Sova A. An efficient reduced-physics-coupling FEM formulation for simulating a molten metal deposition geometry. *European Journal Of Mechanics - A/Solids*, 89 :104290, 2021.
- [4] Feulvarch E., Rassineux A., Roux J., Sova A., Pouvreau C., and Josse F. A membrane finite element for fast simulation of overlapping beads geometry during direct energy deposition additive manufacturing. *Computational Mechanics*, 75(2) :679–688, 2024.
- [5] Jia Y., Saadlaoui Y., Feulvarch E., and Bergheau J. An efficient local moving thermal-fluid framework for accelerating heat and mass transfer simulation during welding and additive manufacturing processes. *Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering*, 419 :116673, 2023.
- [6] Khairallah S. A., Anderson A. T., Rubenchik A., and King W. E. Laser powder-bed fusion additive manufacturing : Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones. *Acta Materialia*, 108 :36–45, 2016.
- [7] Mang C., Lorang X., Tami R., and Rouchon F. Physical Model of a Weld Bead Deposit on an Inclined or Horizontal Support Applied for Wire and Arc Additive Manufacturing. *SSRN*, 2024.
- [8] Mukherjee T., Wei H., De A., and DebRoy T. Heat and fluid flow in additive manufacturing – Part II : Powder bed fusion of stainless steel, and titanium, nickel and aluminum base alloys. *Computational Materials Science*, 150 :369–380, 2018.
- [9] Saadlaoui Y., Delache A., Feulvarch E., Leblond J., and Bergheau J. New strategy of solid/fluid coupling during numerical simulation of thermo-mechanical processes. *Journal Of Fluids And Structures*, 99 :103161, 2020.
- [10] So M. S., Mahdi M. M., Kim D. B., and Shin J. Prediction of Metal Additively Manufactured Bead Geometry Using Deep Neural Network. *Sensors*, 24(19) :6250, 2024.