



HAL
open science

Simulation thermique du procédé Wire Arc Additive Manufacturing

Akram Chergui, Frédéric Vignat, François Villeneuve, Nicolas Béraud

► **To cite this version:**

Akram Chergui, Frédéric Vignat, François Villeneuve, Nicolas Béraud. Simulation thermique du procédé Wire Arc Additive Manufacturing. 16ème colloque national S-mart, Apr 2019, Les Karellis, France. hal-02945795

HAL Id: hal-02945795

<https://hal.science/hal-02945795v1>

Submitted on 28 Sep 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Simulation thermique du procédé Wire Arc Additive Manufacturing

Akram Chergui

Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP, G-SCOP
46 avenue Felix Viallet
38031 Grenoble, France
Mohammed-Akram.Chergui@grenoble-inp.fr

Frédéric Vignat

Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP, G-SCOP
46 avenue Felix Viallet
38031 Grenoble, France
Frederic.Vignat@grenoble-inp.fr

François Villeneuve

Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP, G-SCOP
46 avenue Felix Viallet
38031 Grenoble, France
francois.villeneuve@grenoble-inp.fr

Nicolas Béraud

DP Research Institute
MIBI 672 rue du Mas de Verchant
34000 Montpellier, France
Nicolas.Beraud@dpttechnology.com

Résumé— *Le Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) est le procédé de fabrication additive permettant d'obtenir des pièces par dépôt de fil métallique au moyen des technologies de soudage à l'arc. Cette technologie peu onéreuse permet de fabriquer de grandes pièces métalliques dans un temps réduit. Cependant, la qualité des pièces réalisées par WAAM est grandement affectée par les différents phénomènes thermiques présents au cours de la fabrication. La simulation numérique reste un outil d'analyse efficace pour étudier ces phénomènes. Le but de ce travail est de construire un modèle thermique prédictif du procédé WAAM par la méthode des éléments finis, dont l'objectif final est de fournir les cartes de température tout au long du procédé de fabrication. Le modèle proposé ainsi que les différentes techniques de simulation utilisées sont détaillés dans cet article. Ce modèle est développé sous le code de calcul aux éléments finis Cast3M, et validé par des essais expérimentaux réalisés sur une cellule WAAM, dont un exemple est détaillé dans cet article.*

Mots-clés— *Fabrication Additive, WAAM, Simulation Thermique, Eléments Finis, CMT*

I. INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, la fabrication additive connaît un essor remarquable. Son utilisation ne se limite plus à la réalisation de prototypes. Elle permet désormais la fabrication directe des pièces métalliques fonctionnelles [9]. Les procédés de fabrication additive peuvent être classés en deux grandes familles: fusion sur lit de poudre (Powder Bed Fusion, PBF) et dépôt direct (Direct Energy Deposition, DED) [2]. Actuellement, la technologie Wire-Arc Additive Manufacturing (WAAM) est l'un des procédés DED les plus prometteurs pour la fabrication de grandes pièces métalliques. Contrairement aux autres

procédés de fabrication additive, cette technologie est peu onéreuse, et permet notamment des taux de déposition élevés dans un grand espace de travail.

La fabrication additive arc-fil emploie une énergie électrique pour mettre en fusion un fil d'apport. Les pièces sont obtenues par empilement successif de cordons de soudure en utilisant des robots industriels multiaxes équipés de torches de soudage. Ce type de technologie, qui s'apparente à la technologie traditionnelle du soudage, a connu d'énormes progrès grâce au développement de plus en plus pointu des équipements de soudage. C'est le cas de la technologie Cold Metal Transfer (CMT) développée par Fronius. Comme son nom l'indique, le procédé reste relativement froid par rapport aux autres procédés de soudage à l'arc. L'innovation du CMT consiste à superposer une pulsation mécanique du fil à la pulsation électrique de manière synchronisée. Outre les avantages communs par rapports aux technologies du soudage numérique, le CMT assure un dépôt de fil avec faible apport de chaleur, et quasiment sans projection [4]. Cependant, en dépit de ces nombreux avantages, les différents phénomènes thermiques présents au cours de la fabrication ont un impact majeur sur la qualité des pièces obtenues par le WAAM. En effet, en empilant les cordons, la pièce subit des phases de chauffe et de refroidissement successives, et les champs de températures dans la pièce sont non uniformes. Ceci est fortement lié à la stratégie de dépôt, et affecte grandement la qualité des pièces produites.

Les travaux de Béraud et al. [1] montrent que la simulation reste l'outil d'analyse privilégié afin de mieux comprendre les phénomènes thermiques intervenant en fabrication additive métallique. Cette méthode permet non seulement de réduire

l'expérimentation mais aussi d'optimiser le procédé et d'améliorer la qualité des pièces produites dans un délai réduit et à moindre coût. La plupart des études traitent la simulation du procédé WAAM par la méthode des éléments finis. Les travaux de Xiong et al. [5] [6] ont permis d'étudier le comportement thermique des pièces cylindriques fabriquées par dépôt de fil métallique, grâce à une simulation thermique du procédé par la méthode des éléments finis. D'autres études ont été menées afin d'améliorer l'efficacité et la précision du calcul. Montevecchi et al. [7] [8] ont développé un modèle éléments finis basé sur une technique de remaillage dynamique afin de diminuer le temps de calcul nécessaire. Dans la même perspective, Ding et al. [11] proposent une approche éléments finis basée sur deux modèles (transitoire et stationnaire) afin d'étudier le comportement thermomécanique des pièces fabriquées par dépôt de fil métallique. Michaleris [10] compare les techniques existantes permettant de modéliser l'ajout de matière et propose un nouvel algorithme afin de réduire le temps de calcul.

D'un point de vue simulation, le procédé WAAM est très similaire au soudage multipasse [7]. Cependant, la physique du soudage met en œuvre des phénomènes très complexes de la thermodynamique, du transfert thermique, de l'électricité, et du magnétisme [13]. Simuler ces phénomènes à l'échelle de la pièce peut s'avérer très coûteux en termes de ressources et temps de calcul. Pour cette raison, la plupart des travaux proposent de modéliser l'apport de chaleur en utilisant une source de chaleur volumique permettant d'englober la contribution énergétique des phénomènes qui ont lieu dans le bain de fusion. Le modèle le plus utilisé en simulation numérique du soudage à l'arc est celui proposé par Goldak et al [3]. Associée aux bonnes techniques d'ajout de matière, cette source de chaleur de forme double-ellipsoïde, reste toujours d'actualité, et permet de modéliser l'apport de chaleur en fabrication additive par dépôt de fil métallique, et de retrouver les bonnes cartes de températures des pièces produites.

Dans cet article, un modèle de simulation thermique du procédé WAAM est proposé et implémenté grâce au code de calcul aux éléments finis Cast3M. Les techniques de simulation utilisés ainsi que le modèle de source de chaleur proposé par Goldak sont présentés. Ce dernier est adapté de façon à mieux répondre aux exigences de la simulation. Afin de valider le modèle de simulation proposé, un exemple de deux murs fabriqués par empilement de huit cordons successifs est présenté. Les deux murs sont construits selon deux trajectoires différentes, en utilisant un robot six-axes doté d'une torche de soudage CMT. Des mesures de températures sont effectuées à l'aide de thermocouples, et comparées par la suite aux résultats de la simulation.

II. MODELE ELEMENTS FINIS

A. Modèle de source de chaleur

Goldak et al [3] proposent une source de chaleur volumique sous forme d'une double-ellipsoïde (Figure 1). Celle-ci décrit une densité volumique de flux de chaleur suivant une distribution gaussienne, et s'exprime comme suit:

$$\text{éq. (1): } \begin{cases} q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{\pi abc_f \sqrt{\pi}} \exp\left(-3\frac{x^2}{a^2} - 3\frac{y^2}{b^2} - 3\frac{z^2}{c_f^2}\right) \\ q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{\pi abc_r \sqrt{\pi}} \exp\left(-3\frac{x^2}{a^2} - 3\frac{y^2}{b^2} - 3\frac{z^2}{c_r^2}\right) \end{cases}$$

$$\text{éq. (2): } f_f + f_r = 2$$

$$\text{éq. (3): } Q = \eta UI$$

Où q_f et q_r représentent respectivement les deux densités de flux de chaleur devant et derrière le centre de l'arc, a et b sont la demi-largeur et la pénétration de la source, c_f et c_r sont respectivement les longueurs des deux ellipsoïdes devant et derrière, Q est la puissance fournie par l'arc, U et I sont la tension et l'intensité d'alimentation, η est l'efficacité de l'arc électrique, f_f et f_r sont respectivement les coefficients de distribution du flux de chaleur devant et derrière l'électrode.

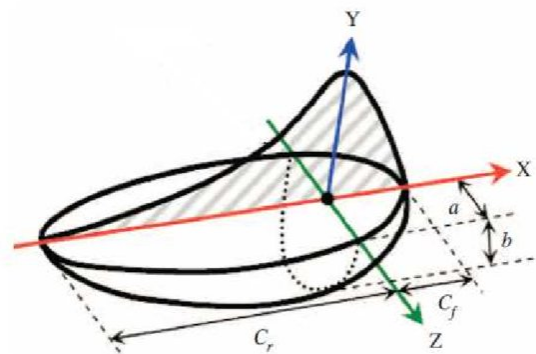


Figure 1. SOURCE DE CHALEUR DE GOLDAK

La détermination des paramètres a , b , c_f , et c_r n'est pas aisée et nécessite toujours un recalage sur des données expérimentales (mesures de températures ou relevés de la zone fondue). Dans l'absence de ces données, Goldak et al. [3] recommandent de prendre la longueur c_f égale à la moitié de la profondeur de pénétration b , et une longueur c_r égale à la profondeur de pénétration de la source. Les paramètres utilisés dans la simulation ont été mesurés sur le bain de fusion des cordons déposés, puis ajustés en recalant les courbes de températures simulées sur les résultats expérimentaux (Tableau 1).

Paramètres	Q (W)	η	a (mm)	b (mm)	c_f (mm)	c_r (mm)
Valeurs	960	0,95	3	3	3	6,5

Tableau 1. PARAMETRES DE LA SOURCE DE CHALEUR

En fabrication additive arc-fil, l'énergie fournie par l'arc n'est pas entièrement transmise à la pièce d'une façon directe. En effet, environ 50% de l'énergie de l'arc est employée pour mettre en fusion le fil d'apport. Cette énergie est transmise par la suite à la pièce par le biais de l'enthalpie de la gouttelette déposée [7]. Afin de mieux prendre en compte cette répartition

d'énergie entre le fil et la pièce dans la simulation, seulement la moitié de la source de Goldak est utilisée afin de modéliser l'énergie transmise directement par l'arc au bain de fusion. L'énergie restante est transmise par le biais des éléments ajoutés. En effet, la procédure d'ajout de matière proposée dans ce modèle, permet pour chaque pas de temps de déposer des éléments possédant une quantité d'énergie équivalente à l'énergie fournie par la moitié de la source de Goldak (Figure 2). Autrement dit :

$$\text{éq. (4):} \quad Q_{source} = Q_{elements} = \frac{\eta UI}{2}$$

B. Modélisation de l'apport de matière

Il existe plusieurs techniques pour modéliser l'ajout de matière en simulation par éléments finis des procédés de fabrication additive. Ces techniques peuvent être distinguées en deux grandes familles : « inactive element method » et « quiet element method » [10]. Dans la première catégorie, les éléments représentant les cordons déposés sont initialement inactifs, puis ils sont activés progressivement suivant le passage de la source de chaleur. Dans la deuxième catégorie, les éléments de la région déposée sont actifs dès le démarrage du calcul, cependant, de très faibles valeurs sont assignées à leurs propriétés matériaux (conductivité thermique, capacité thermique, etc). Puis ces valeurs sont modifiées progressivement lors du passage de la source de chaleur. Dans les deux techniques, les éléments représentant les cordons déposés sont présents dès le début du calcul. Ceci risque d'introduire des erreurs dans l'analyse éléments finis, et nécessite un temps de calcul plus élevé [10].

Dans le modèle proposé, l'apport de matière est modélisé en utilisant une technique de remaillage. Cette technique consiste à construire progressivement le maillage représentant les cordons déposés suivant la trajectoire du dépôt. En effet, la procédure d'apport de matière développée permet, pour chaque pas de temps, dans la phase de dépôt, de rajouter des éléments finis au maillage précédent. Ces éléments modélisant la gouttelette déposée, sont ajoutés lors du passage de la source de chaleur, et possèdent une énergie équivalente à cette dernière. Cette technique est rendue possible grâce à la souplesse de programmation offerte par le code de calcul Cast3M (Figure 3).

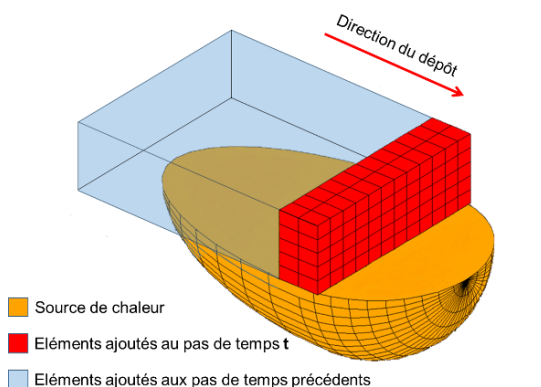


Figure 2. REPARTITION D'ENERGIE ENTRE LA SOURCE ET LES ELEMENTS AJOUTES

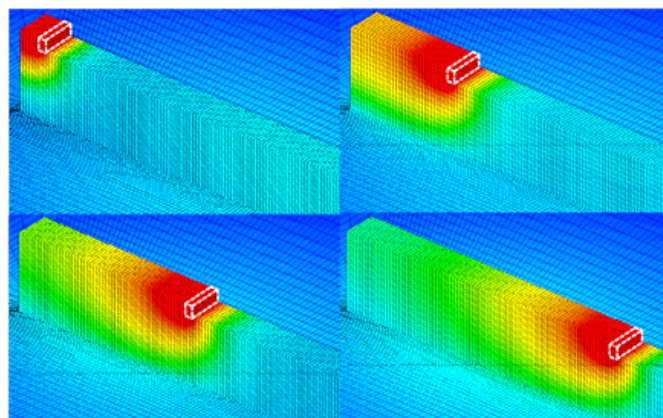


Figure 3. EVOLUTION DU MAILLAGE PAR LA PROCEDURE D'APPORT DE MATIERE

C. Propriétés matériaux

Deux alliages d'aluminium sont considérés dans les différentes expériences et simulations. Il s'agit d'un fil d'apport en alliage 5356 (AlMg5Cr), déposé sur une plaque en alliage 5083 (AlMg4,5Mn0,7). Ces deux alliages possèdent des propriétés matériaux très similaires, et sont considérés isotropes. L'évolution de certaines propriétés telles que la conductivité thermique, la capacité thermique, et la masse volumique en fonction de la température est aussi prise en compte dans la simulation. Aussi, le changement de phase est considéré dans ce modèle comme la variation triangulaire de la capacité thermique du matériau entre le solidus et le liquidus (Figure 4). Cet intervalle de fusion se situe entre 580°C et 635°C pour les deux alliages, et la chaleur latente de fusion est fixée à 380 KJ/Kg.

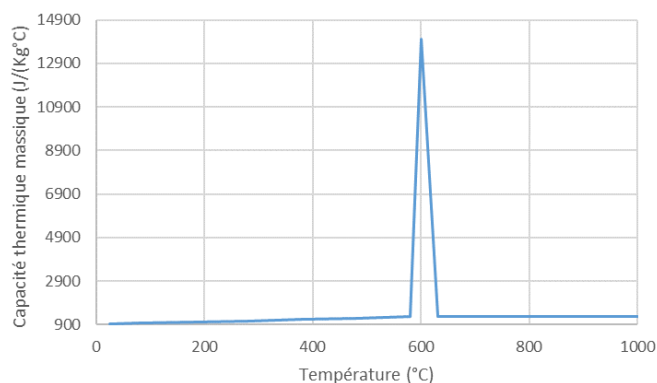


Figure 4. EVOLUTION DE LA CAPACITE THERMIQUE MASSIQUE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE

D. Conditions aux limites

Dans le modèle thermique proposé, trois modes de transfert de chaleur sont considérés : conduction, convection et rayonnement. Avant le début de la phase de dépôt, la plaque sur laquelle le métal est déposé est à température ambiante (20°). Ainsi, tous les nœuds représentant la plaque sont considérés à

cette température à $t = 0$. Aussi, la modélisation des phénomènes de transfert de chaleur dans les régions déposées peut s'avérer difficile à cause de la nature du maillage qui évolue à chaque pas de temps dans la phase de dépôt. Pour résoudre ce problème, une procédure de mise à jour du modèle matériau et des conditions aux limites est développée. Combinée à la technique d'apport de matière utilisée, cette procédure permet d'actualiser le modèle global en prenant en compte les propriétés matériaux des nouveaux éléments rajoutés au maillage précédant. Les conditions aux limites sont à leur tour actualisées après chaque pas de temps, en recalculant les nouvelles surfaces de convection et de rayonnement. Cependant, il est pratique courante de négliger la convection et le rayonnement dans le maillage représentant les régions déposées afin de réduire la complexité et le temps de calcul. Cette simplification reste vraie dans le cas où la surface des pièces fabriquées est relativement petite par rapport à la surface de la plaque. Dans le cas de grandes pièces, elle peut devenir une source d'erreur [10].

III. VALIDATION

Dans l'objectif de valider le modèle de simulation élaboré, un plan d'expérience s'appuyant sur les mesures des températures est proposé dans cette partie. Ces mesures sont comparées aux résultats numériques obtenus et permettent d'évaluer la pertinence de ces derniers.

A. Protocole expérimental

L'installation utilisée dans ces expériences consiste en une cellule WAAM composée d'un robot six axes Yaskawa MA1440 équipé d'une torche de soudage CMT de Fronius, et d'un positionneur deux axes. La matière utilisée lors de ces expériences est issue d'une bobine de fil en alliage 5356 et de diamètre 1,2 mm. Les cordons sont déposés sur une plaque en alliage 5083 placée sur le positionneur. Le dépôt de cordons s'effectue sous une protection gazeuse 100% Argon avec un débit de 13 L/min (Figure 5).

Deux murs de 80 mm de longueur et 6 mm de largeur sont fabriqués sur deux plaques différentes. Ces plaques sont de 5 mm d'épaisseur pour 250 mm de côté (Figure 7.a). Centrés au milieu de la plaque, les deux murs sont construits en empilant successivement huit cordons de 2 mm de hauteur. Chaque mur est fabriqué selon une stratégie différente. Le premier mur (Figure 6.a et Figure 7.b) est fabriqué suivant une trajectoire Raster. Dans cette stratégie le dépôt de matière se fait uniquement dans une seule direction. Quant au second mur (Figure 6.b et Figure 7.c), la matière est déposée dans les deux directions, suivant une trajectoire Zigzag. Les cordons sont déposés avec une vitesse de 10 mm/s, soit 8 secondes par cordon. Un temps d'arrêt de 3,5 secondes est planifié après le dépôt de chaque cordon.

Pendant le processus de fabrication, la température est mesurée en différents points de la plaque à l'aide de six thermocouples. Ces thermocouples sont positionnés à la surface de la plaque aux points : P1, P2, P3, P4, P5, et P6 (Figure 7.a), et disposés de façon à recalculer les paramètres de la source de chaleur (thermocouples P1, P2, et P3) ainsi que les coefficients d'échange de chaleur (thermocouples P4, P5, P6). Les températures sont acquises durant une phase de dépôt d'une

durée de 92 secondes et une phase de refroidissement de 88 secondes, soit un temps de réalisation de 180 secondes par pièce. Les thermocouples utilisés sont de type K, et ont les caractéristiques suivantes : une précision de $\pm 2,2$ °C, une plage de température située entre -200°C et 1250°C, et une fréquence d'échantillonnage de 10 Hz

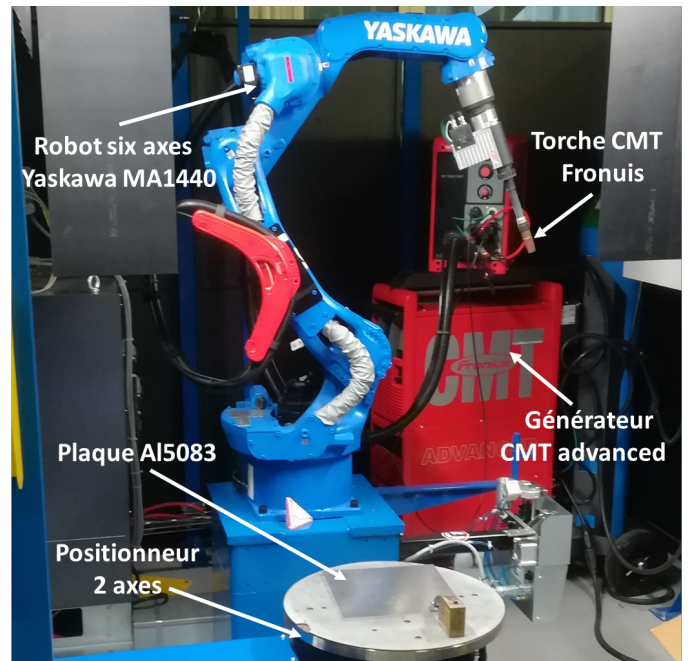


Figure 5. ENVIRONNEMENT DE FABRICATION WAAM

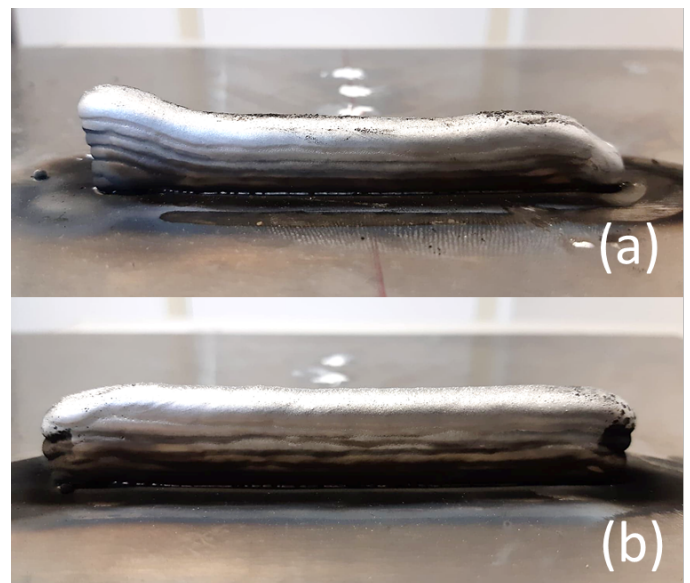


Figure 6. PIÈCES FABRIQUÉES SUIVANT : (a) STRATÉGIE RASTER ; (b) STRATÉGIE ZIGZAG

B. Résultats

La Figure 8 représente les courbes de températures en fonction du temps aux points P1, P2, et P3, obtenus en empilant les huit cordons suivant la stratégie Raster (Figure 7.b). Les courbes de températures issues de la stratégie Zigzag (Figure 7.c), sont montrées en Figure 9 (points P1, P2, P3), et Figure 10 (points P4, P5, P6). Les courbes de températures obtenues par la mesure des thermocouples sont représentées en trait continu, et les courbes obtenus par la simulation numérique sont représentées en pointillé.

Le premier constat est que les courbes de température obtenues à partir du modèle éléments finis correspondent bien à celles mesurées à l'aide des thermocouples, L'erreur existante entre les valeurs simulées et les valeurs expérimentales peut être dû à l'inertie thermique ainsi qu'à la précision des thermocouples, mais aussi aux valeurs des coefficients de convection et d'émissivité utilisées dans le modèle.

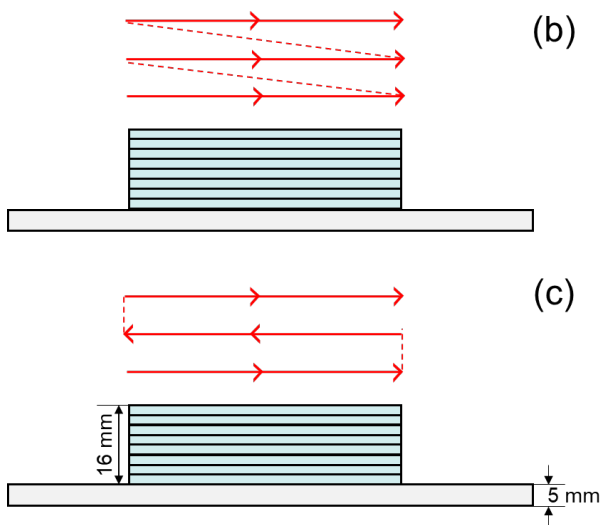
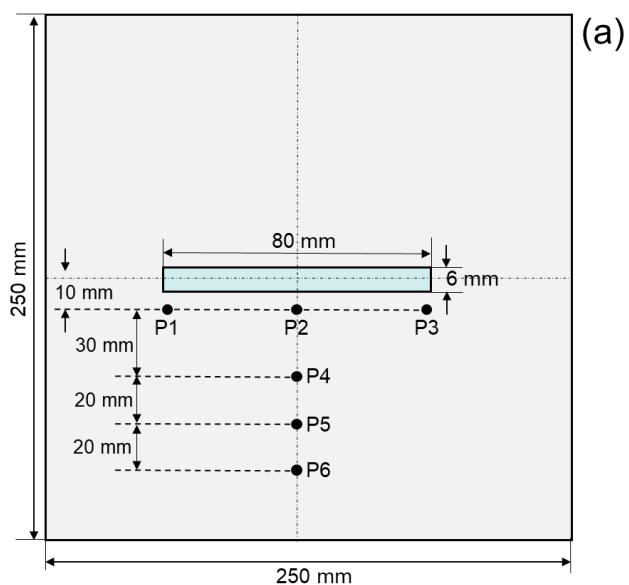


Figure 7. PLAN D'EXPERIENCE

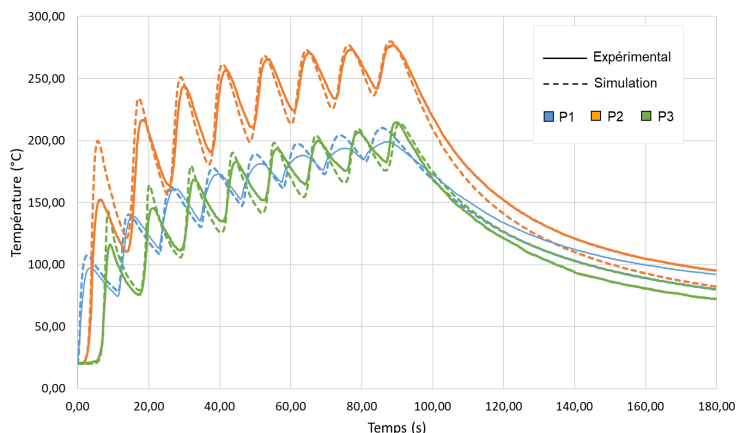


Figure 8. COMPARAISON DES PROFILS DE TEMPERATURES (EXPERIMENTALES ET SIMULES) AUX POINT P1, P2 ET P3 OBTENUS PAR LA STRATEGIE RASTER

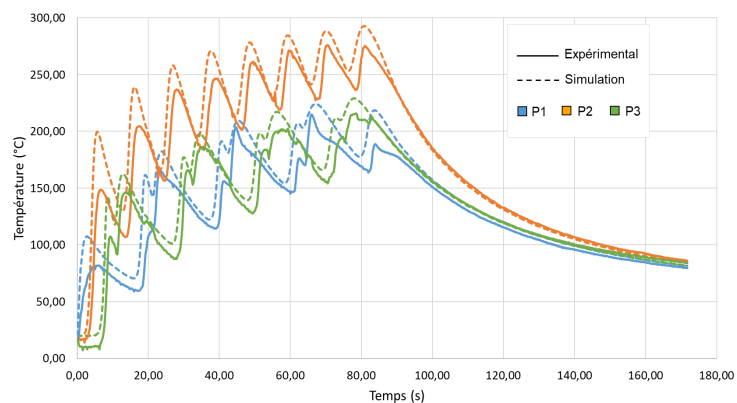


Figure 9. COMPARAISON DES PROFILS DE TEMPERATURES (EXPERIMENTALES ET SIMULES) AUX POINT P1, P2 ET P3 OBTENUS PAR LA STRATEGIE ZIGZAG

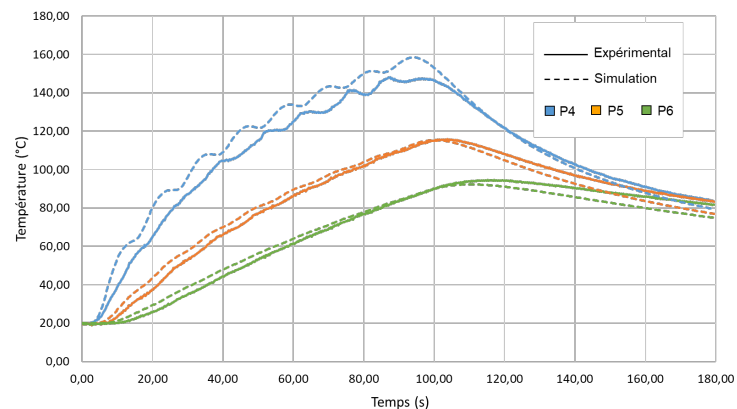


Figure 10. COMPARAISON DES PROFILS DE TEMPERATURES (EXPERIMENTALES ET SIMULES) AUX POINT P4, P5 ET P6 OBTENUS PAR LA STRATEGIE ZIGZAG

Pendant la phase de dépôt, huit pics peuvent être distingués sur l'ensemble des courbes de la Figure 8. Ces pics représentent le passage de la source de chaleur proche des points P1, P2, et P3, situés à 5 mm des cordons déposés.

Dans le cas du mur fabriqué suivant la stratégie Zigzag, un ensemble de quatre pics composés de deux sommets successifs chacun, sont enregistrés sur les courbes correspondant aux points P1 et P3 au lieu de huit pics séparés (Figure 9). Ceci est dû au fait qu'en stratégie Zigzag, la torche passe et revient rapidement sur le même point d'extrémité afin d'entamer le dépôt du cordon suivant. Ce détail a été non seulement mesuré par les thermocouples mais a également été obtenu par la simulation. Ainsi, il est possible d'évaluer la précision des résultats qui peuvent être obtenus par la simulation développée.

IV. CONCLUSION

Ce travail a porté sur le développement d'un modèle de simulation thermique du procédé WAAM par la méthode des éléments finis. Dans ce modèle, la source de chaleur proposée par Goldak a été adaptée et associée à la technique d'apport de matière proposée afin de mieux considérer la répartition de l'énergie entre le métal d'apport et la piscine de fusion. Cette technique d'apport de matière s'appuie sur une procédure de remaillage, et permet de réduire le temps de calcul comparé aux autres techniques proposées dans la littérature. Une méthode alternative permettant de modéliser le changement de phase a été adoptée dans ce modèle afin d'éviter les problèmes de convergence. L'implémentation des procédures d'apport de matière et de mise à jour du modèle matériau et des conditions aux limites est rendu possible grâce à la souplesse de programmation offerte par le code de calcul Cast3M. Enfin, un exemple de validation expérimentale a été proposé dans cet article, montrant une parfaite concordance entre les courbes de températures obtenues par l'expérimentation et la simulation.

Disposer d'une simulation précise et spécifique au procédé WAAM peut s'avérer utile à la compréhension des différents phénomènes thermiques présents au cours de la fabrication, mais aussi à la détermination des critères thermiques permettant de garantir la qualité des pièces produites. L'identification et l'optimisation de ces critères en se basant sur le modèle de simulation proposé fera l'objet de travaux futurs.

V. REFERENCES

- [1] N. Beraud, « Fabrication Assistée par Ordinateur pour le procédé EBM », Thèse, Université Grenoble Alpes, 2016.
- [2] B. Vayre, F. Vignat, F. Villeneuve, « Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects », *Mechanics & Industry*, vol. 13, n° 2, p. 89-96, 2012.
- [3] J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby « A New Element Model for Welding Heat Source. *Metallurgical Transactions* » B, 1984. vol. 15B, pp 299-305
- [4] P. Robert, M. Museau, H. Paris « Effet de la température du substrat sur la qualité des cordons déposés avec la technologie CMT », *MUGV*, 2018

- [5] J. Xiong, Y. Lei, et R. Li, « Finite element analysis and experimental validation of thermal behavior for thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing with various substrate preheating temperatures », *Applied Thermal Engineering*, vol. 126, p. 43-52, nov. 2017.
- [6] J. Xiong, R. Li, Y. Lei, et H. Chen, « Heat propagation of circular thin-walled parts fabricated in additive manufacturing using gas metal arc welding », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 251, p. 12-19, janv. 2018.
- [7] F. Montevecchi, G. Venturini, A. Scippa, G. Campatelli, « Finite Element Modelling of Wire-arc-additive-manufacturing Process », *Procedia CIRP*, vol. 55, p. 109-114, 2016.
- [8] F. Montevecchi, G. Venturini, N. Grossi, A. Scippa, et G. Campatelli, « Finite Element mesh coarsening for effective distortion prediction in Wire Arc Additive Manufacturing », *Additive Manufacturing*, vol. 18, p. 145-155, déc. 2017.
- [9] S. Campocasso, V. Hugel, B. Vayre. « Génération de trajectoires pour la fabrication additive par dépôt de fil robotisé multi-axes - Application à une tubulure torique », 15ème Colloque national AIP-Primeca, pp.1-5, 2017
- [10] P. Michaleris, « Modeling metal deposition in heat transfer analyses of additive manufacturing processes », *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 86, p. 51-60, sept. 2014.
- [11] J. Ding et al., « Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts », *Computational Materials Science*, juill. 2011.
- [12] M. M. El-Sayed, A. Y. Shash, et M. Abd-Rabou, « Finite element modeling of aluminum alloy AA5083-O friction stir welding process », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 252, p. 13-24, févr. 2018.
- [13] J. Hu et H. L. Tsai, « Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I: The arc », *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, no 5 6, p. 833 846, mars 2007.