



Modélisation des dimensions géométriques de cordon aux points de changement de direction en WAAM

François Rouchon, Sylvain Lavernhe, Christophe Tournier, Xavier Lorang

► To cite this version:

François Rouchon, Sylvain Lavernhe, Christophe Tournier, Xavier Lorang. Modélisation des dimensions géométriques de cordon aux points de changement de direction en WAAM. Conférence Manufacturing'21, Jun 2021, Angers (en ligne), France. hal-03268258

HAL Id: hal-03268258

<https://hal.science/hal-03268258>

Submitted on 23 Jun 2021

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.



Modélisation des dimensions géométriques de cordon aux points de changement de direction en WAAM

François ROUCHON ^(a,b), Sylvain LAVERNHE ^(b), Christophe TOURNIER ^(b),
Xavier LORANG ^(a)

(a) IRT SystemX, Institut de Recherche Technologique SystemX, 91120 Palaiseau, France

(b) Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, LURPA, 91190 Gif-sur-Yvette, France

Mail : prénom.nom@ens-paris-saclay.fr

Résumé : la fabrication additive par dépôt de fil à l'arc est une technologie en plein essor et propose, du fait de ses taux de déposes élevées et de son coût raisonnable, une alternative prometteuse à la fabrication soustractive. Les dimensions géométriques des cordons déposés sont influencées par de nombreux paramètres et notamment par la cinématique de la trajectoire mise en œuvre. Les changements de direction du point piloté au cours de la trajectoire entraînent systématiquement des variations cinématiques. Une modélisation de l'évolution de la géométrie des cordons déposés au passage de points de changement de direction est donc proposée.

La géométrie du cordon est déterminée par balayage d'une conique élémentaire asymétrique en s'appuyant sur la trajectoire de la torche de soudage. Les dimensions géométriques de cette conique sont issues de modèles établis préalablement en fonction des paramètres du procédé mis en œuvre et de l'observation du bain liquide. Son orientation est fixée à l'aide de la trajectoire de poursuite de la torche. Le volume balayé identifié sous forme d'un champ de voxels est ensuite comparé à la géométrie des cordons observée expérimentalement.

L'étude réalisée a permis de mettre en évidence l'influence des différents paramètres cinématiques de la trajectoire sur la géométrie des cordons fabriqués et la modélisation développée permet de prédire d'éventuelles accumulations indésirables de matière au cours de la trajectoire.

Mots clés : Wire Arc Additive Manufacturing, trajectoires, comportement cinématique, géométrie des cordons.

1 Introduction

La fabrication de pièce en WAAM consiste à déposer un ensemble de cordons afin de remplir un volume défini par un modèle CAO. La trajectoire de dépôt calculée en FAO doit balayer l'ensemble des sections de chaque couche tout en évitant les redondances. La géométrie des cordons dépend des paramètres du procédé mis en œuvre et en particulier de la vitesse d'avance de la torche portée par le robot V_r et de la vitesse de fil dévidé V_f . La vitesse d'avance programmée de la torche n'est pas toujours respectée du fait du comportement cinématique du robot tout particulièrement lors du passage de points de changement de direction de la trajectoire de fabrication. Cela a tendance à générer une accumulation de matière qui peut être à l'origine de défauts qui, en se propageant couche après couche, peuvent compromettre la fabrication.

Les principaux modèles rapportés dans la littérature consistent à associer une fonction gaussienne, trigonométrique ou polynomiale à la section d'un cordon (Ding, 2015a)(Cao, 2011)(Xiong, 2013). Ainsi, en fonction du modèle choisi, il est possible de faire le lien entre la largeur w et la hauteur h du cordon et les paramètres procédé V_r et V_f au moyen des paramètres de la fonction associée. Le modèle polynomial de section est le plus souvent retenu dans la littérature pour des cordons rectilignes déposés à vitesse constante (Plangger, 2019) (Panchagnula, 2016) (Suryakumar, 2011).

(Rios, 2018) et (Mohebbi, 2020) proposent quant à eux des modèles analytiques afin de déterminer l'équation de la section dans le cas d'un cordon rectiligne déposé avec des paramètres procédé constants. La fabrication de croisillons, de structures en forme de "T" (Venturini, 2016) (Mehnen, 2011) et de manière plus générale, la fabrication de n'importe quelle géométrie en WAAM met en œuvre des stratégies de remplissage générant des points de changement de direction pour lesquels les modèles sont les mêmes que pour les parties rectilignes et donc peu représentatifs de la géométrie réelle du cordon (Ding, 2015b) (Nguyen 2020). Ces différentes approches proposent donc de simuler la géométrie des cordons en extrudant les sections modélisées le long de la trajectoire nominale de la torche. De part et d'autre d'un point de changement de direction, ce type de modélisation nécessite de raccorder les sections afin de remplir le manque de matière à l'extérieur du virage ce qui est fait intuitivement par un balayage angulaire de la section (figure 1). Cependant, le volume du raccordement angulaire est nécessairement plus faible que le volume redondant à l'intérieur du virage. De plus, en s'appuyant sur la trajectoire nominale de la torche, les variations cinématiques du robot au passage de points de changement de direction ne sont pas prises en compte. Ainsi l'usage de telles modélisations appliquées aux points de changement de direction ne

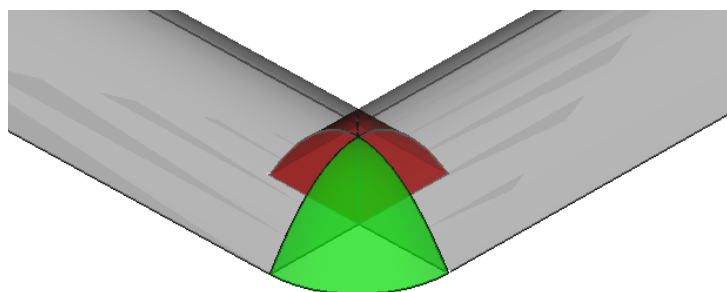


Figure 1 : Modélisation géométrique par extrusion d'une section ; problématique des changements de direction de trajectoire.

permet pas de retranscrire l'accumulation de matière et l'augmentation de la hauteur du cordon observées systématiquement.

Ainsi cet article propose une nouvelle approche pour modéliser la géométrie des cordons sur des segments rectilignes ainsi qu'aux raccordements entre segments discontinus en tangence. Après une présentation du contexte expérimental dans la seconde partie, l'étude du comportement cinématique du robot est présentée dans la troisième partie. Le concept de trajectoire de poursuite est abordé dans la quatrième partie. Enfin une nouvelle approche pour la modélisation du dépôt de matière est abordée dans la cinquième partie avant de présenter les conclusions et perspectives de ces travaux.

2 Contexte expérimental

L'installation expérimentale de la plateforme Additive Factory Hub est composée d'un robot FANUC arcMate 120iC muni de son contrôleur R30iB et d'une source Fronius™ TPS 600i (figure 2). Les cordons sont réalisés dans les conditions suivantes : un fil $\varnothing 1\text{mm}$ en acier Mn4Ni2CrMo, un gaz d'inertage Air Liquide Arcal M14 (Ar + CO₂ 3% + O₂ 1%), une synergie CMT Universel 3248 et un substrat en S355.

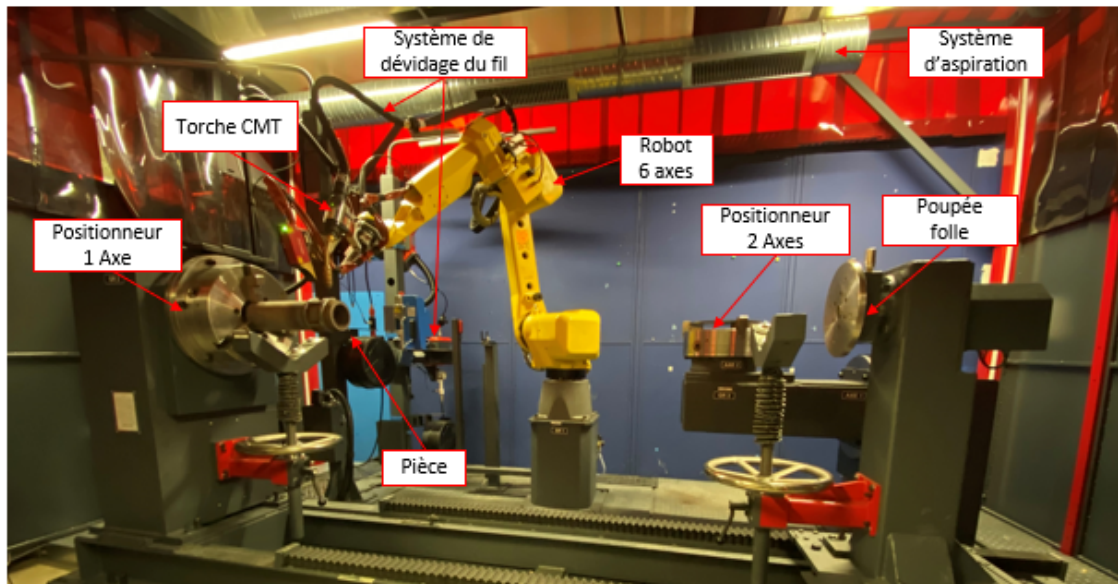


Figure 2 : Equipement WAAM de la plateforme Additive Factory Hub

Les expérimentations réalisées consistent à mettre en œuvre des angles α de 45°, 90° et 135° avec un lissage τ de 50 (coefficient allant de 0 à 100), une vitesse d'avance du robot V_r de 0,75 m/min et une vitesse de fil programmée de 8 m/min (figure 3). Cette configuration de paramètres du procédé correspond à un cordon rectiligne propre et satisfaisant. La géométrie des cordons fabriqués est mesurée à l'aide d'une caméra de suivi de joint FUJI-CAM™ montée à l'extrémité du robot et possédant des résolutions verticale et horizontale de 0,06 mm et 0,035 mm. Une fois le nuage de points reconstruit dans le repère pièce, les points du cordon sont balancés par rapport au plan du substrat identifié à l'aide d'un algorithme de type RANSAC et recalés sur les trajectoires nominale et mesurée décrites par le point piloté du robot. La trajectoire mesurée est obtenue directement via le contrôleur du robot.

3 Cinématique robot

Le point piloté du robot suit nécessairement une trajectoire C^1 dans l'espace des tâches. Cela implique donc l'apparition d'une erreur de corde et/ou une diminution de la vitesse d'avance du point piloté par rapport à la trajectoire nominale décrite par des segments linéaires donc de continuité C^0 . On se propose donc d'étudier l'influence des paramètres géométriques de la trajectoire et options de programmation associés sur le comportement cinématique du robot.



Figure 3 : Cordons fabriqués

3.1 Paramètres géométriques et cinématiques

Lors de la programmation d'une trajectoire, à chaque point défini par le positionnement de la torche sont associés une vitesse d'avance programmée V_r et un paramètre τ de lissage de la trajectoire. Compte tenu des faibles vitesses d'avance mises en œuvre lors de la fabrication en WAAM, seuls les comportements du robot pour des vitesses de 0,75 m/min et 0,50 m/min ont été quantifiés. Le paramètre de lissage τ quant à lui peut varier de 0 à 100, définissant ainsi le compromis réalisé par le contrôleur du robot entre la diminution de vitesse et l'erreur de corde. Plus ce paramètre est élevé, plus la trajectoire est lissée afin de conserver une vitesse proche de celle programmée au voisinage des changements de direction. Le comportement cinématique du robot est donc conditionné par ces deux paramètres ainsi que par l'angle α défini par les deux segments consécutifs et non tangents de la trajectoire. Pour quantifier l'influence de ces paramètres, les deux grandeurs observées sont la vitesse minimum atteinte lors du franchissement du point de changement de direction et la distance minimale entre la trajectoire mesurée et ce point. Ces grandeurs permettent respectivement de caractériser la diminution de vitesse et l'importance du lissage de la trajectoire.

3.2 Analyse des mesures

En l'absence de dépôt de matière, la trajectoire consiste simplement à suivre une polygône mettant en œuvre différentes combinaisons de paramètres cinématiques. La figure 4 illustre le comportement du robot au passage d'angles aigus, droits et obtus. Naturellement, plus l'angle de changement de direction est important, plus la diminution de vitesse est importante et plus l'erreur de corde est importante. Ces observations sont tout à fait cohérentes avec les résultats issus de la littérature.

A chaque point de changement de direction, la vitesse minimale du point piloté de la torche ainsi que sa distance minimale à chacun des points de passage ont été relevées. La figure 5 illustre l'évolution de la vitesse minimale relative à la vitesse programmée et

l'erreur de corde en fonction de l'angle α et du paramètre de lissage τ pour les vitesses V_r de 0,75 et 0,50 m/min.

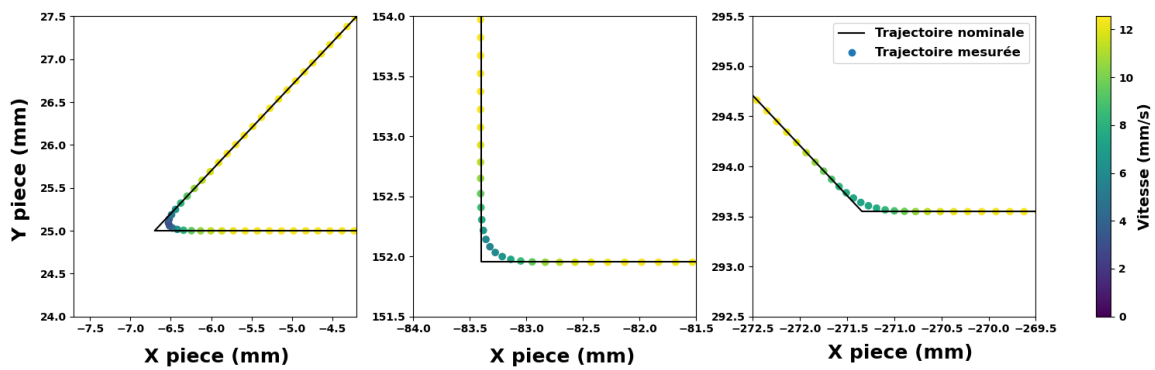
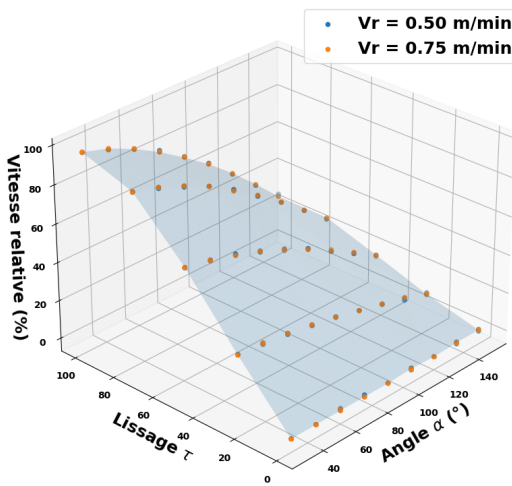


Figure 4 : Trajectoire mesurée du point piloté pour des angles aigus, droits et obtus avec une vitesse programmée de 0,75 mm/min et un paramètre τ de 50

On constate que la vitesse minimale atteinte est la même pour les deux valeurs de vitesse mises en œuvre. L'évolution de l'erreur de corde a la même allure pour les deux vitesses programmées et il se trouve que là aussi, le ratio entre l'erreur de corde et la vitesse programmée évolue de la même manière pour les deux vitesses programmées. Pour un paramètre de lissage τ nul, le point piloté du robot passe par l'intégralité des points de la trajectoire programmée, la vitesse minimale de passage des points de changement de direction et l'erreur de corde associée sont donc toujours nulles, et ce quels que soient les paramètres cinématiques mis en œuvre. Dans un contexte de fabrication et en l'absence de possibilité de modulation de la vitesse de fil V_f , le choix d'un paramètre τ nul est à éviter puisqu'il entraîne nécessairement une accumulation de matière aux points de changement de direction.

Vitesse relative par rapport à la vitesse programmée en fonction des paramètres cinématiques



Evolution de l'erreur de corde en fonction des paramètres cinématiques

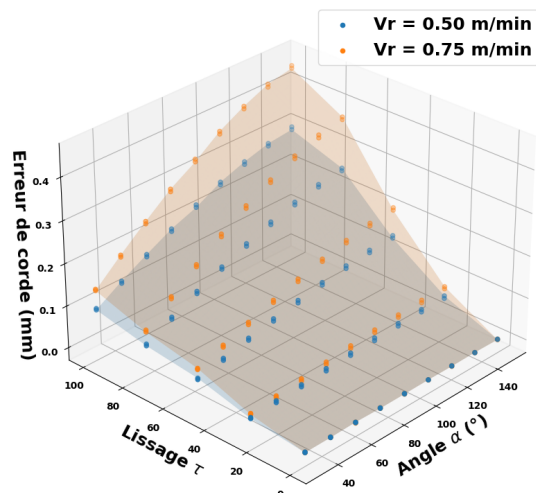


Figure 5 : (a) évolution de la vitesse minimale en fonction des paramètres α et τ
(b) évolution de l'erreur de corde en fonction des paramètres α et τ

Il est envisageable de simuler le parcours des trajectoires par le robot dans l'espace des tâches en utilisant un modèle à accélération ou à jerk limité pour connaître l'évolution

de la vitesse effective de la torche et anticiper sa contribution sur l'accumulation de matière rencontrée lors du passage de points de changement de direction (Erkorkmaz, 2001)(Beaudaert, 2013). Néanmoins, du fait des erreurs de corde relativement faibles par rapport à la taille d'un cordon, la trajectoire décrite par le point piloté du robot ne semble pas plus appropriée que la trajectoire nominale dans l'optique d'une modélisation de la géométrie des cordons par extrusion d'une section.

4 Géométrie des cordons et trajectoire de poursuite

On constate que la répartition de la matière au voisinage d'un point de changement de direction est très décentrée par rapport à la trajectoire nominale (figure 6a). Ni la trajectoire nominale ni la trajectoire mesurée ne peut être considérée comme la « spine » du cordon. Il faut donc considérer un autre type de courbe pour définir cette trajectoire perçue selon les sections perpendiculaires au cordon.

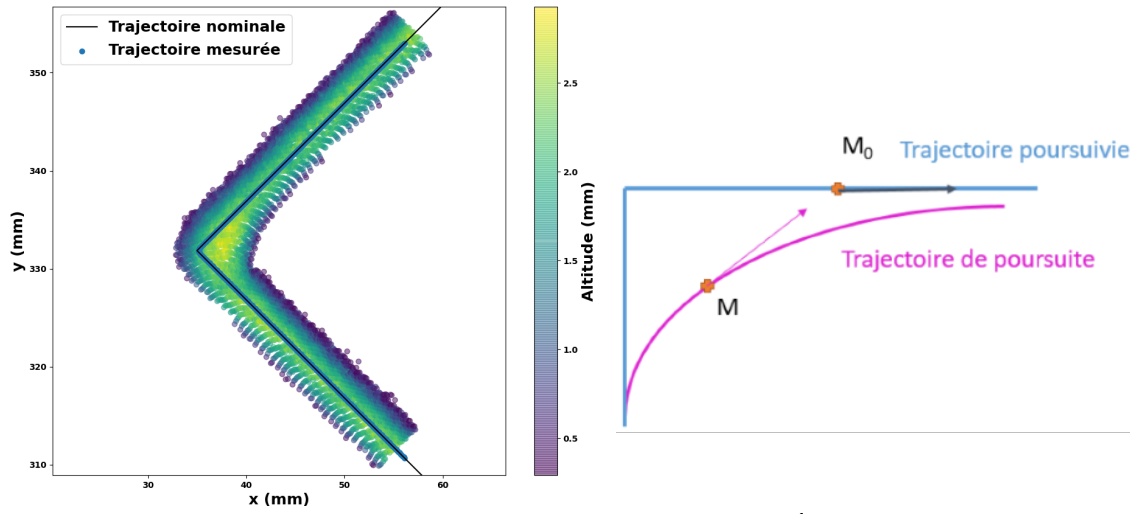


Figure 6 : (a) géométrie mesurée d'un cordon ; $V_r = 0,75 \text{ m/min}$, $\alpha = 90^\circ$ et $\tau = 50$;
(b) schéma de principe de la trajectoire de poursuite

4.1 Trajectoire de poursuite

L'allure du cordon et la répartition de la matière par rapport à la trajectoire décrite par le point piloté de la torche laissent à penser que le bain liquide représenté par le point M , générateur de la géométrie du cordon à sa solidification, suit le point piloté M_0 et décrit donc une trajectoire de poursuite. Cela se traduit par le fait que la tangente à la trajectoire suiveuse au point M est toujours orientée vers le point suivi M_0 comme l'illustre la figure 6b. Ainsi, si l'on considère que la distance entre les points M et M_0 est constante et est paramétrée par l :

$$\overrightarrow{OM(s)} + l \cdot \frac{d\overrightarrow{OM(s)}}{ds} = \overrightarrow{OM_0(s)} \quad (1)$$

où s représente l'abscisse curviligne de la trajectoire.

L'unicité de la solution à l'équation (1) est donnée par la valeur de la distance de poursuite l . On constate que ce type de trajectoire permet de décrire le caractère

asymétrique de la géométrie du cordon déposé contrairement à la trajectoire décrite par le point piloté du robot (figure 6a). Pour ce cordon en particulier, la trajectoire de poursuite calculée avec une distance de 5 mm semble être la plus appropriée pour décrire la « spine » du cordon.

Cependant l'extrusion d'une section polynomiale le long de cette trajectoire ne semble pas être adaptée pour décrire la géométrie des cordons autour des points de changement de direction (figure 7). On constate un manque de matière sur l'extérieur du virage ainsi qu'un repliement à l'intérieur du virage, le rayon de courbure de la trajectoire de poursuite étant inférieur à la demi-largeur de la section extrudée.

La modélisation de la géométrie des cordons autour des points de changement de direction par extrusion d'une section le long d'une courbe décrivant mieux la trajectoire suivie par le cordon ne permet donc pas de rendre compte de la réalité. Une stratégie de modélisation du dépôt de matière est donc proposée, s'appuyant sur la trajectoire de poursuite à la torche qui demeure révélatrice de la géométrie des cordons fabriqués.

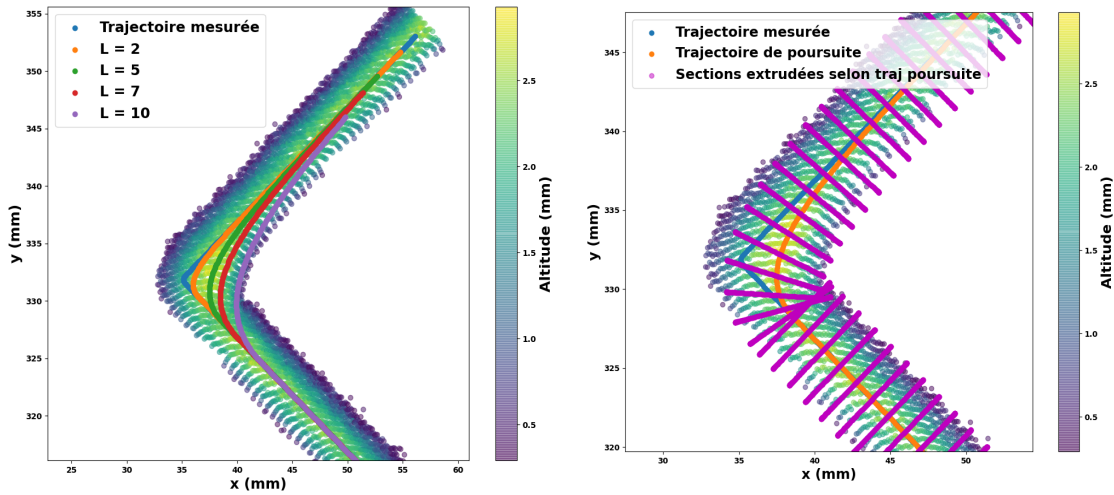


Figure 7 : (a) trajectoires de poursuite pour différentes longueurs ;
(b) extrusion selon une trajectoire de poursuite

5 Modélisation du dépôt de matière

La modélisation proposée consiste à faire parcourir la trajectoire décrite par la torche à une fonction représentant la densité de répartition de la matière. Cette fonction étant asymétrique et son centre n'étant pas fixé sur le point piloté de la torche, son orientation est fixée par la trajectoire de poursuite. Pour chaque position m le long de la trajectoire, la fraction de volume déposé à l'extrémité de la torche depuis l'étape $m-1$ selon la répartition fixée par la fonction de densité $f_m(x,y)$ est ajoutée. Ainsi pour un point de l'espace $z_{[i,j]}$ la quantité de matière déposée s'exprime :

$$z_{[i,j]} = \sum_m f_m(x_{[i,j]}, y_{[i,j]}) \cdot Vol_m \quad (2)$$

$$\text{avec : } Vol_m = V_f \cdot \pi \cdot \left(\frac{\phi_{fil}}{2}\right)^2 \cdot (t_m - t_{m-1}) \quad (3)$$

L'équation (2) peut donc être réécrite :

$$z_{[i,j]} = \sum_m f_m(x_{[i,j]} - s_m, y_{[i,j]}) \cdot V_f \cdot \pi \cdot \left(\frac{\phi_{fil}}{2}\right)^2 \cdot \frac{(s_m - s_{m-1})}{V_r} \quad (4)$$

Il n'est pas aisé de déterminer analytiquement la fonction de répartition f_m permettant de générer un cordon de section polynomiale. Pour pallier ce problème, la fonction de répartition proposée ici est un double ellipsoïde inspiré des modélisations des sources de chaleur de type Goldak largement utilisées dans le domaine de la simulation du comportement thermomécanique du processus de soudage et plus récemment en fabrication additive (Goldak, 1984). Elle s'exprime tel que :

$$f(x, y) = \begin{cases} \frac{3}{(a_b + a_f) \cdot b \cdot \pi} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a_{b,f}}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \\ 0 \end{cases} \quad (5)$$

avec b le demi-axe partagé par les deux ellipsoïdes et a_b et a_f respectivement les demi-axes de la partie aval (*back*) et amont (*front*) (figure 8). Cette fonction de répartition est adimensionnée telle que le volume sous sa surface soit égal à 1.

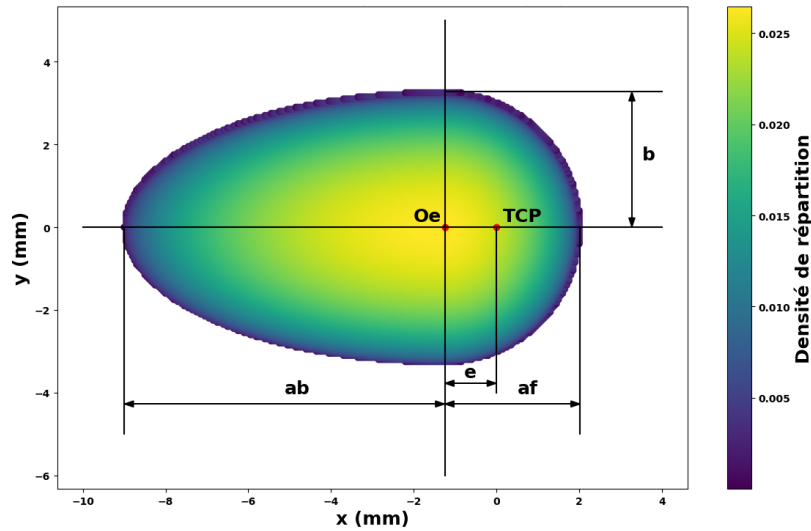


Figure 8 : Fonction de répartition en double ellipsoïde et ses paramètres associés

L'originalité de cette approche de mettre en œuvre une modélisation volumique du cordon basée sur un cumul de dépôt de matière et, d'autre part, de faire un parallèle entre la géométrie du bain liquide et la fonction de répartition de la matière. Aussi, sans chercher à connaître en détail l'évolution thermique de la matière au cours du dépôt, définir la fonction de répartition sur une isotherme semble pertinent en considérant que le solidus du bain suit ce contour. Ainsi l'identification des paramètres géométriques consiste à faire correspondre la définition de la fonction de répartition avec celui du solidus du bain liquide.

On peut remarquer que la densité la plus élevée de la fonction de répartition est située au centre du double ellipsoïde. Les observations de l'évolution du bain liquide en cours de dépôt ne permettent pas à ce stade d'établir un lien simple entre lieu de densité maximale et position de l'extrémité du fil (TCP).

5.1 Identification des paramètres du modèle

Pour identifier les paramètres du modèle proposé (a_b , a_f , b , e), le bain liquide a été observé en cours de fabrication à l'aide d'une caméra protégée par un verre polarisé permettant de filtrer une grande partie de la lumière issue de l'arc électrique et montée directement sur la torche. Le choix du point de vue de la caméra est fait en fonction des contraintes d'accessibilité avec la torche et pour assurer la visibilité du bain de fusion (longueur et largeur). L'observation reste partielle et pourrait être améliorée par l'ajout d'une caméra supplémentaire.

Pour identifier les dimensions du bain liquide sur les portions rectilignes de la trajectoire, différents points caractéristiques sont relevés manuellement puis projetés sur la base locale de la torche, base identifiée grâce à un damier servant de mire de calibration qui est positionné dans le référentiel de la pièce. Les paramètres géométriques sont ensuite identifiés comme étant des combinaisons des dimensions estimées du bain (figure 9a). À titre de première vérification, le modèle proposé est ensuite mis en œuvre sur une portion rectiligne avec les paramètres géométriques nouvellement identifiés. La fonction de répartition obtenue dans sa dernière position reposant sur les contributions des étapes précédentes est projetée sur l'image du bain liquide (figure 9b).

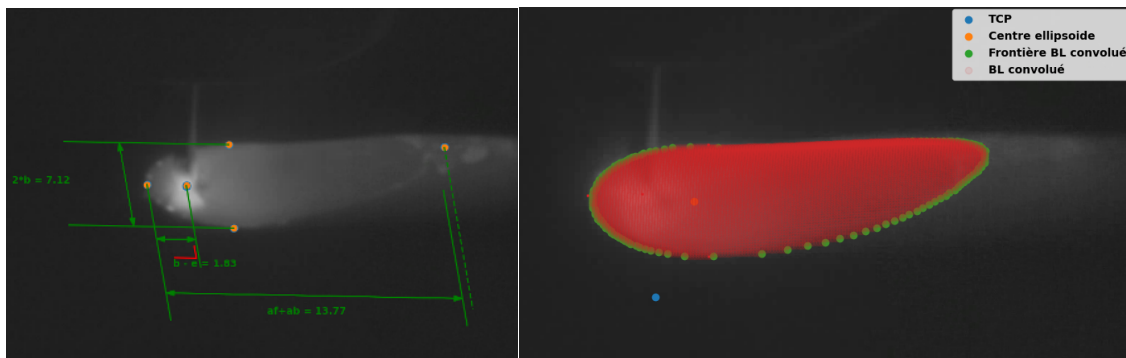


Figure 9 : (a) exemple d'image du bain liquide au cours de la fabrication ;
(b) projection de la fonction de répartition sur l'image du bain liquide

5.2 Comparaison des simulations avec les données expérimentales

Afin de confronter les simulations avec les cordons réalisés, une distance signée entre chaque point mesuré et le point modélisé le plus proche est calculée. Une distance positive (resp. négative) indique que le point mesuré se situe au-dessus (resp. au-dessous) de son voisin simulé le plus proche par rapport à la verticale (figure 10).

On constate que sur les portions rectilignes en amont et en aval du point de changement de direction, les distances sont relativement faibles, ce qui indique que la simulation décrit de manière assez réaliste la géométrie des cordons mesurés. Au niveau du point de changement de direction, la simulation montre une accumulation au centre du cordon associée à des lacunes de part et d'autre de celle-ci. Le modèle ne décrit en effet pas l'étalement de la matière sur les périphéries du cordon observé. Les dimensions de la fonction de répartition utilisées pour cette modélisation ont été identifiées sur une portion rectiligne du cordon et sont fixées comme constantes lors du calcul. L'observation du bain liquide lors du franchissement d'un point de changement de

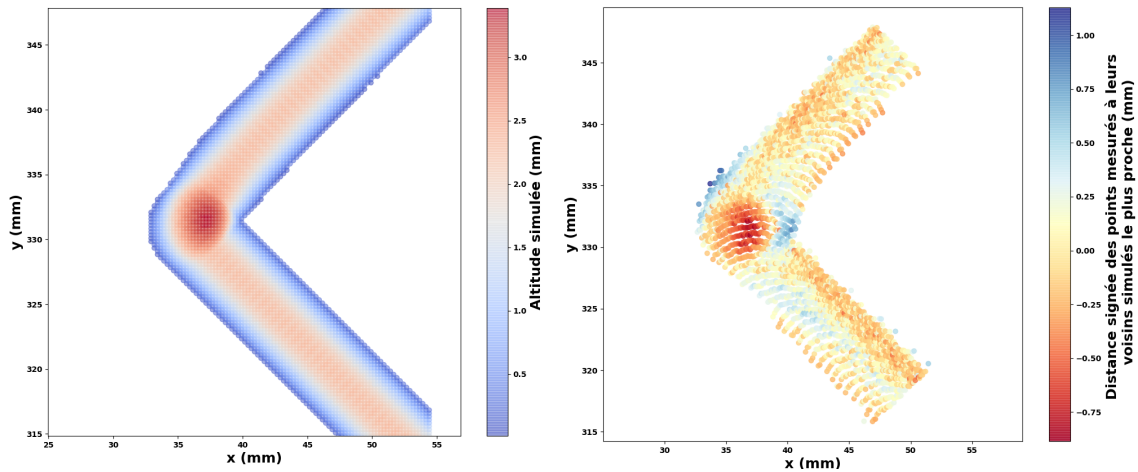


Figure 10 : (a) Géométrie simulée ; (b) Cartographie des distances ; $V_r = 0,75 \text{ m/min}$, $\alpha = 90^\circ$ et $\tau = 50$

direction montre une évolution de la géométrie du bain qui n'est pas retranscrite ici, ce qui peut donc en tout ou partie expliquer les écarts observés en particulier dans cette zone. L'étude de l'évolution de la fonction de répartition au cours de la fabrication constitue la principale piste d'amélioration de ce modèle.

6 Conclusion et perspectives

Les travaux présentés constituent une nouvelle approche concernant la modélisation de la géométrie des cordons fabriqués en WAAM. La démarche s'appuie sur un triptyque constitué du comportement cinématique du robot, de la définition d'une trajectoire de poursuite à la torche et de la modélisation de l'apport de matière comme une fonction de densité de répartition. Cette approche globale semble décrire fidèlement la géométrie de cordons rectilignes, mais demande à être améliorée pour représenter plus fidèlement le dépôt de matière autour des points de changement de direction. L'étude de l'évolution de la fonction de répartition au voisinage d'un point de changement de direction doit donc être approfondie.

Remerciements

Les auteurs remercient l'ensemble des membres du consortium Additive Factory Hub pour leur soutien dans la réalisation de ces travaux et plus particulièrement Quentin Petavy CETIM et Xavier Gostiaux Vallourec pour leurs contributions aux essais sur l'équipement WAAM.

Références

- X.Beudaert, S. Lavernhe, C. Tournier (2013) 5-axis local corner rounding of linear tool path discontinuities, *Int Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol 73, pp. 9-16
- Y. Cao, S. Zhu, X. Liang, W. Wang (2011) Overlapping model of beads and curve fitting of bead section for rapid manufacturing by robotic MAG welding process, *Rob and Comp-Int Manuf*, vol 27 (3), pp. 641-645
- D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li (2015a) A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM), *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol 31, pp. 101-110
- D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li (2015b) A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thinwalled structures, *Robotics and Computer Integrated Manuf.*, vol 34, pp.8-19.
- K. Erkorkmaz, Y. Altintas (2001) High speed CNC system design. Part I: jerk limited trajectory generation and quantic spline interpolation, *Int Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol 41(9), pp. 1323-1345

- J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby (1984) A new finite element model for welding heat sources. *Metall Mater Trans B*, vol 15, pp. 299–305
- J. Mehnen, J. Ding, H. Lockett, P. Kazanas (2011) Design for Wire and Arc Additive Layer Manufacture, *Global Product Development*, pp.721-727
- M.S. Mohebbi, M. Kühn, V. Ploshikhin (2020) A thermo-capillary-gravity model for geometrical analysis of single-bead wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Int J Adv Manuf Technol* vol 109, pp. 877–891
- L. Nguyen, B. Johannes, M. Bambach (2020) Multi-bead Overlapping Models for tool path generation in Wire-Arc Additive Manufacturing Processes, *Procedia Manufacturing*, vol 47, pp. 1123-1128
- J.S. Panchagnula, S. Simhambhatla (2016) Inclined slicing and weld-deposition for additive manufacturing of metallic objects with large overhangs using higher order kinematics, *Virtual and Physical Prototyping*, vol 11 (2), pp. 1-10
- J. Plangger, P. Schabhüttl, T. Vuherer, N. Enzinger (2019) CMT Additive Manufacturing of a High Strength Steel Alloy for Application in Crane Construction. *Metals*, vol 9, pp. 650 – 664
- S. Ríos, P.A. Colegrove, F. Martina, S.W. Williams (2018) Analytical process model for wire + arc additive manufacturing, *Additive Manuf*, vol 21, pp. 651–657.
- S. Suryakumar, K.P. Karunakaran, A. Bernard, U. Chandrasekhar, N. Raghavender, D. Sharma (2011) Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing, *Comput. Aided Des.* vol 43 (4) pp. 331–344
- G. Venturini, F. Montevecchi, A. Scippa, G. Campatelli (2016) Optimization of WAAM deposition patterns for T-crossing features, *Procedia CIRP*, vol 55, pp. 95-100
- J. Xiong, G. Zhang, H. Gao, L. Wu (2013) Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol 29, pp. 417-423