Approche phénoménologique du contrôle de la géométrie de cordons en WAAM

Diego Verbist, Nicolas Béraud, Matthieu Museau, Frédéric Vignat, Sylvain Lavernhe

▶ **To cite this version:**

Diego Verbist, Nicolas Béraud, Matthieu Museau, Frédéric Vignat, Sylvain Lavernhe. Approche phénoménologique du contrôle de la géométrie de cordons en WAAM. 18ème colloque national Smart, GIS S.mart, Apr 2023, Carry-le-Rouet, France. hal-04131351

HAL Id: hal-04131351
https://hal.science/hal-04131351

Submitted on 16 Jun 2023

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.

S.mart
Systems.Manufacturing.Academics.Resources.Technologies
Générations S.mart
Collectif-Partage-Diversité
18ème colloque national
4-6 avril 2023, Carry le Rouet

Approche phénoménologique du contrôle de la géométrie de cordons en WAAM

D. Verbist [a]*, N. Beraud [a], M. Museau [a], F. Vignat [a], S. Lavernhe [b]

[a] Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP
[b] Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, LURPA, 91190, Gif-sur-Yvette, France

* E-mail : diego.verbist@grenoble-inp.fr

1. INTRODUCTION

Parmi les techniques de Fabrication Additive métallique, la fabrication par Arc-Fil (WAAM en anglais) offre divers avantages, notamment un dépôt de matière à fort débit ainsi que la possibilité de travailler dans un volume de dimensions importantes. Cette technologie est donc particulièrement adaptée à la fabrication de grandes pièces.

La technologie WAAM se base en partie sur le procédé de soudage, où un fil métallique est dévidé par l'intermédiaire d'une torche à une vitesse contrôlée, nommée WFS (Wire Feed Speed). Cette torche est alors déplacée par rapport à la pièce à une vitesse nommée TS (Torch Speed) pour étendre le dépôt de matière sur un substrat, habituellement une plaque, ou une pièce existante. Le rapport WFS/TS qualifie la quantité de matière déposée par unité de longueur de cordon. La contribution de celui-ci dans le contrôle de la géométrie du cordon a été qualifiée comme majeure dans la littérature [1, 2].

Une des variantes du procédé WAAM, est l'utilisation du mode Cold Metal Transfer (CMT), un mode de soudage développé par Fronius et qui apporte un pilotage spécifique du cycle d'apport d'énergie et de matière, c'est-à-dire du déclenchement de l'arc, couplé à une oscillation fil. Les caractéristiques de ce mode CMT sont :

- un mouvement d'aller-retour du fil, qui plongeant dans le bain de fusion créé un court-circuit, puis remontant en établissant un arc électrique de courte durée afin de faire fondre localement le fil ainsi déposer une goutte de métal. Le WFS instantané peut alors être positif ou négatif, nous considérons alors une valeur moyenne du WFS pour qualifier le dépôt ;
- une plus faible accumulation de chaleur en comparaison avec la soudure conventionnelle MIG/MAG du fait d'un apport énergétique plus faible.

Un autre contributeur majeur est la température de dépôt de matière Tdep [3]. Cette température est définie dans la littérature [3, 4] comme la température au point de dépôt de matière, où se situe le bain de fusion, tout au cours du processus. Dans leurs modèles physiques respectifs, Rouchon [5] et Mohebbi [6] montrent que la température de dépôt influence la tension superficielle du bain de fusion, ce qui conditionne la façon dont le matériau se dépose sur le substrat, donnant ainsi lieu à des géométries de cordon différentes.

Tdep n'est pas un paramètre directement pilotable, nous sommes donc contraints de le contrôler indirectement à travers d'autres paramètres, à savoir : le mode de parcours de la trajectoire, la géométrie et dimensions du substrat, le rapport WFS/TS, les caractéristiques de l'arc, entre autres.

Le grand nombre des paramètres ayant une influence sur Tdep rend difficile la maîtrise de celui-ci. Diverses méthodes de contrôle de température ont été explorées dans la littérature.

Scotti [7] étudie le contrôle de température à travers des systèmes de refroidissement actif par semi immersion de façon à mieux évacuer la chaleur et maintenir des conditions thermiques de dépôt plus constantes sur différentes couches. Manokruang [4] propose de contrôler cette température de dépôt par la préchauffe du substrat à une température initiale nommée T_init et un temps d'attente entre couches. Cette approche permet d'améliorer la mouillabilité des premières couches ainsi que de réduire le différentiel de température entre les premières couches et les couches supérieures.

Le contrôle des paramètres du procédé est notamment important dans le cas d'utilisation d'alliages d'aluminium [8]. Ce matériau possède un coefficient de dilatation thermique relativement élevé, ce qui le rend plus sensible aux variations de température de dépôt entre différentes couches pouvant engendrer des contraintes résiduelles élevées et des déformations macroscopiques associées. De plus, le coefficient de conductivité thermique particulièrement élevé de ce matériau influence fortement le comportement thermique du procédé et la forme des cordons lors de la solidification.
Les travaux précédents menés au laboratoire G-SCOP ont permis de recenser les paramètres physiques ayant une influence prépondérante sur la géométrie de cordons. Une certaine base de connaissance a été établie afin de construire un modèle phénoménologique Manokruang [4]. Les travaux actuels ont pour objectif de contrôler la géométrie des pièces fabriquées, donc des cordons suivant différentes situations géométriques et conditions thermiques. Les travaux présentés dans cet article visent d'une part à étendre le modèle phénoménologique reliant les dimensions géométriques des cordons, les paramètres opératoires et les états thermiques. D'autre part, inversement aux modèles de la littérature qui définissent la géométrie des cordons en fonction des paramètres physiques et opératoires, nous cherchons à pouvoir déterminer des paramètres opératoires garantissant ou s'approchant d'une géométrie ciblée pour obtenir les dimensions souhaitées.

Cet article décrit dans un premier temps la conception des expériences réalisées sur la cellule WAAM, puis l'extraction des données géométriques, la simulation de l'état thermique du procédé et finalement le traitement de ces données pour une représentation nous permettant de créer le modèle visé.

2. METHODE

Nous définissons les expériences à réaliser sur une base de données existantes au laboratoire et initiée par Manokruang [4]. Les essais de dépôt de cordon avec différents paramètres investiguent notamment différentes valeurs de rapport WFS/TS.

Le matériel utilisé pour réaliser les essais consiste en une cellule WAAM détaillée en Figure 1, composée robot YASKAWA MA1440 six axes, d'un poste de soudure TPS CMT 4000 de Fronius et d'un plateau chauffant.

2.1. Dépôt de cordons

Le but dans un premier temps est d'étudier le dépôt des éléments les plus simples réalisables par ce procédé : des mono-cordons rectilignes.

Pour ceci la démarche commence par un dépôt de cordons sur un substrat de type plaque plane. L'étude se centre notamment sur la variation de la géométrie du cordon en testant les différentes combinaisons de TS et T_init.

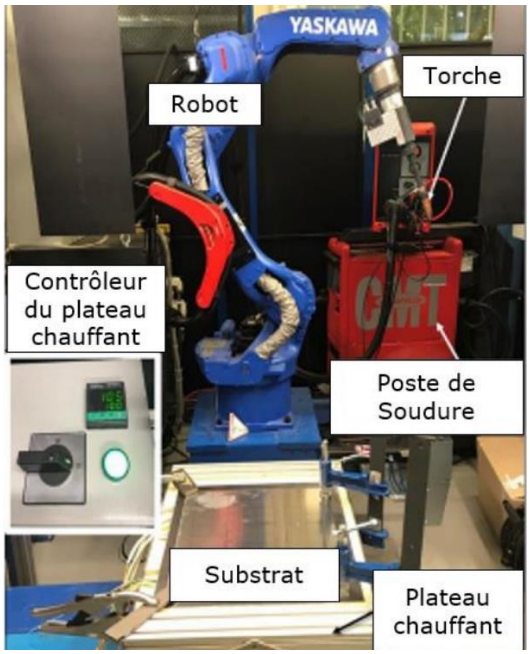

Figure 1 – Détail de la cellule WAAM utilisée [4]

Tableau 1 – Paramétrie pour les essais

Paramètres	Valeur	Unité
Matériaux :		
Fil Electrode	Al 5056	
Substrat	Al 5083	
Dimensions :		
Diamètre du fil	1,2	mm
Plaque substrat	250 x 250 x 5	mm
Longueur des cordons	100	mm
Paramètres de soudage :		
Loi de synergie	CMT 875	
Vitesse d'apport du Fil (WFS)	5	m/min
Vitesse de la Torche (TS)	30, 45, 60, 75, 90	cm/min
Distance tube contact-substrat	15	mm
Débit d'Argon	13	L/min
Paramètres Thermiques :		
Température de préchauffe du substrat (T_init)	25, 100, 200, 300, 400	°C

La plaque substrat est serrée sur le plateau chauffant, et chauffée par celui-ci à la température consigne T_init. Pour chaque valeur de T_init sont réalisés des cordons avec différents TS constituant ainsi un plan complet. Un temps d'attente suffisant est effectué entre chaque fabrication de cordon pour respecter l'homogénéisation de la température dans le substrat.

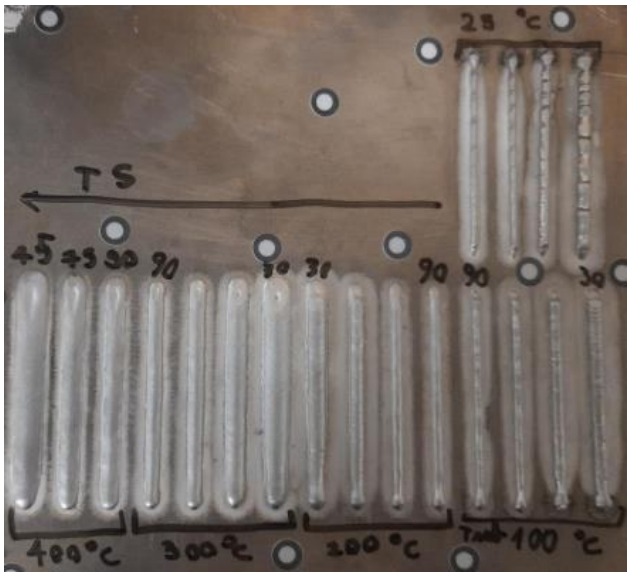

Figure 2 – Cordons déposés sur la plaque substrat

2.2. Caractérisation des dimensions des cordons

À la suite du dépôt des cordons, leur géométrie est numérisée à l'aide d'un scanner 3D Handyscan 700.

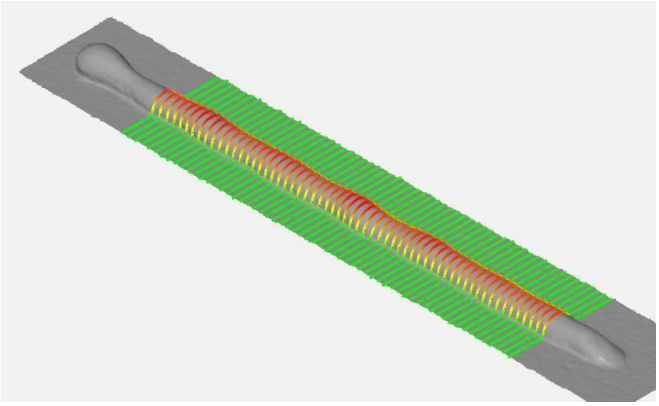

Figure 3 – Traitement du modèle numérique de la géométrie

A l'aide du logiciel GOM Inspect le nuage de points représentant la géométrie du cordon est traité et plusieurs profils de section droite du cordon espacés de 1 mm sont extraits, sur la partie stable (hors début et fin de cordon).

Différents modèles géométriques de ces profils ont été explorés dans la littérature. Ding [2] compare les associations de la géométrie réelle à des fonctions paraboliques, sinusoïdales ou encore d'arc de cercle. Dans notre cas, et en cohérence avec les travaux de Manokruang [4], l'approche retenue est celle d'un arc de cercle, particulièrement adaptée à ce matériau et angle de mouillage sur le substrat.

Ce modèle nous permet de définir aisément les dimensions usuelles du cordon à savoir son rayon R et sa hauteur H. La hauteur est calculée an ajoutant au rayon la position du centre du cercle Zc par rapport au substrat.

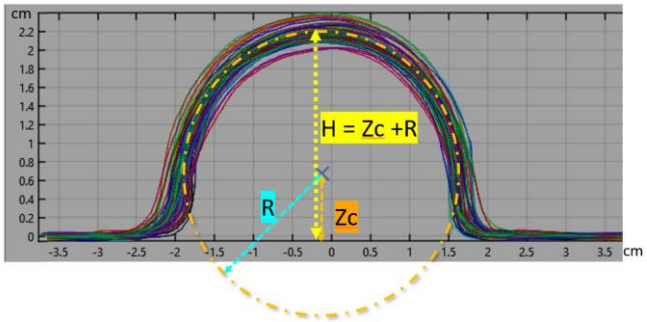

Figure 4 – Traitement du modèle numérique de la géométrie

Les profils extraits des sections sont traités par un script Python qui associe un cercle avec la méthode des moindres carrés et renvoie les valeurs du R et de la position du centre du cercle Zc. À partir de ces valeurs, l'aire de la section de chaque cordon A est calculée selon la configuration :

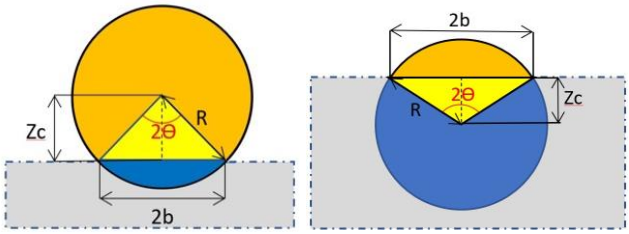

Figure 5 – Deux configurations possibles selon si le centre du cercle est au-dessus (Zc->0) -ou en dessous (Zc<0) du substrat.

Dans le cas où Zc>0, l'aire sur la plaque A est donnée par la formule :

$$A = R^2 * (\pi - \theta) + b * Zc \qquad (1)$$

Or b peut s'exprimer comme $(R * \sin\theta)$ et l'angle θ peut est égal à $acos(Zc/R)$, donc on a :

$$A = R^2 * (\pi - acos(Zc/R)) + Zc * \sin(\text{acos}(Zc/R)) * R$$

Dans le cas où Zc<0, la formule devient :

$$\mathrm{A} = \theta * \mathrm{R}^2 - b * Zc \qquad (2)$$

Donc on a :

$$\mathrm{A} = acos\left(\frac{|\mathrm{Zc}|}{R}\right) * \mathrm{R}^2 - |\mathrm{Zc}| * sin\left(acos\left(\frac{|\mathrm{Zc}|}{\mathrm{R}}\right)\right) * \mathrm{R}$$

Une fois la méthode de mesure et de modélisation mise en place, il est possible de relier les données relatives à la géométrie des cordons aux valeurs des paramètres physiques et de pilotage correspondants.

2.3. Gestion de la température de dépôt

Pour le cas mono-cordon rectiligne sur une plaque plane, le paramètre thermique le plus influent, Tdep, peut être obtenu par simulation thermique du procédé.

Pour paramétrer cette simulation au plus proche des conditions de fabrication réelles, les données relatives au procédé de soudage tension et intensité moyennes peuvent être relevées sur le poste Fronius suite au dépôt.

En nous basant sur ces données et sur les données géométriques, un programme de simulation thermique basé sur le logiciel Cast3m permet de calculer le champ de températures pendant le processus. Dans ce programme, développé par Akram Chergui [3], on modélise par éléments finis le processus de dépôt de matière. Sont pris en compte :

- les apports de chaleur comme la préchauffe ainsi que la chaleur contenue dans le nouveau matériau déposé et celle introduite par l'arc électrique (assimilé à une source de Goldak) ;
- les caractéristiques du matériau comme la masse volumique, la conductivité et capacité thermiques, les températures de changement de phase, la chaleur latente de fusion ;
- la dissipation d'énergie par conduction et par rayonnement ;
- les dimensions du cordon, dont la géométrie est approchée par un parallélépipède rectangle dimensionné pour conserver le volume.

Le programme calcule le champ de températures sur la plaque entière et modélise le procédé pas à pas : à chaque pas de calcul, un tronçon de cordon est déposé sur la plaque, le maillage est mis à jour et les températures sont recalculées.

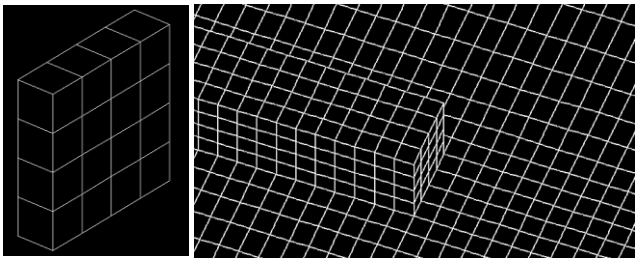

Figure 6 – Visualisation du maillage d'un tronçon de cordon et des empilements successifs pour former un cordon

A l'issue de la simulation du cordon, pour chaque pas de temps, la température au point de dépôt de matière Tdep (illustré dans la Figure 7) est révélée.

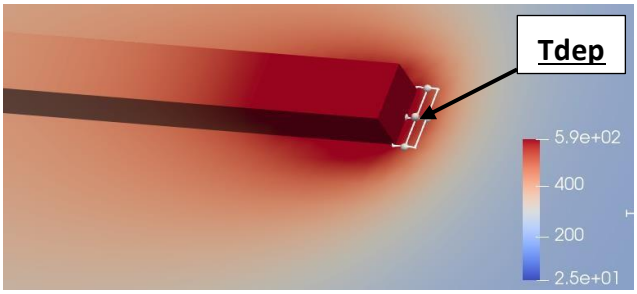

Figure 7 – Visualisation du champ de température issu de la simulation

3. RESULTATS

Dans le but de contrôler la géométrie de la pièce fabriquée, on recherche les paramètres opératoires à appliquer afin de déposer localement un mono-cordon de géométrie R et H. Cet objectif passe par la mise en relation des paramètres R et H avec les paramètres physiques pilotant le procédé, notamment le débit matière donné par le rapport WFS/TS et les conditions thermiques dont une image est donnée par Tdep.

Différentes surfaces de réponse peuvent ainsi être tracées. Il est important de mentionner que la valeur saisie dans la synergie sur le poste de soudure, nommée ici WFS synergique (WFS_S), est une valeur guide pour aider les soudeurs mais dans la complexité du fonctionnement de la source cette valeur en l'état n'est pas directement maîtrisable ni parfaitement régulée. Cette valeur est sensiblement différente du paramètre nommé WFS déposé (WFS_D), représentant la physique du procédé réel et calculé à partir de l'aire des sections de cordons. L'écart entre ces deux valeurs dépend entre autres de la loi de synergie, de la distance torche-substrat et la température de dépôt, qui est à son tour influencée par les conditions de dépôt (WFS_S/TS, T_init et forme du substrat).

Le plan d'expériences réalisé se base sur des valeurs du ratio WFS_S/TS. Cependant comme cette valeur a tendance à surestimer de 20% la valeur du ratio WFS_D/TS, les surfaces de réponse retenues sont celles basées sur la mesure, donc utilisant WFS_D/TS. Ainsi les expériences ont été réalisées pour un WFS_S synergique saisi sur le poste FRONIUS de 5 m/min, mais les graphes de surface de réponse ont été tracés en fonction d'un WFS_D calculé à partir de l'aire des cordons déposés.

3.1. Lien R – H – Tdep – WFS/TS

La Figure 8 donne l'évolution du rayon du cordon en fonction de Tdep et de WFS_D/TS. Les valeurs du rayon augmentent avec les valeurs de Tdep ou WFS_D/TS.

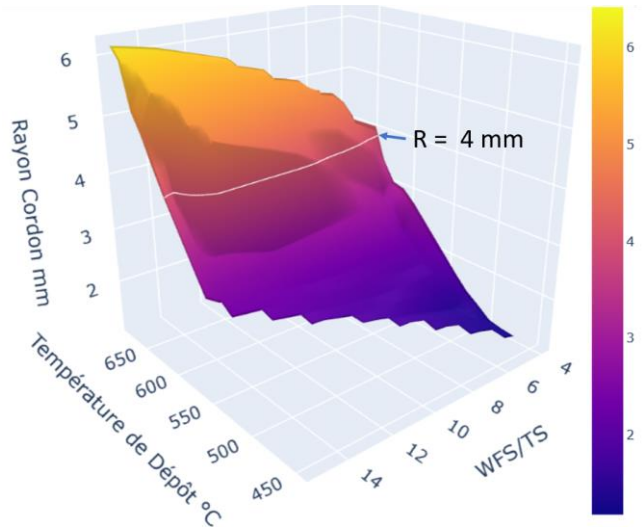

Figure 8 – Surface de réponse de R fonction de Tdep et WFS_D/TS

La Figure 9 donne l'évolution de la hauteur du cordon en fonction de Tdep et de WFS_D/TS

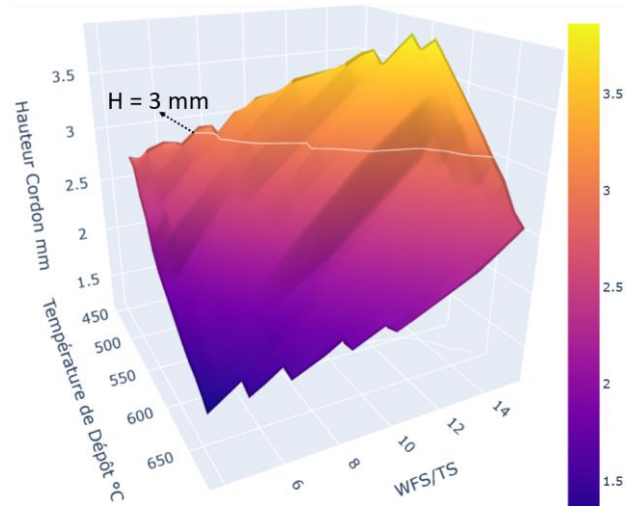

Figure 9 –Surface de réponse de H fonction de Tdep et WFS_D/TS

Le paramètre de hauteur augmente avec des valeurs du rapport WFS_D/TS élevées, mais contrairement à R, il diminue lorsque la température de dépôt augmente. En effet, des valeurs de WFS_D/TS élevées signifient plus de matière déposée, donc un cordon plus gros (R et H augmentent). Alors qu'une Tdep plus élevée fait diminuer la tension superficielle du cordon [4], en conséquence, celui-ci a donc tendance à s'affaisser (R augmente, H diminue).

En associant ces deux graphes, il peut être possible de déterminer, pour un couple (R, H) choisi :

- s'il est possible de réaliser ou non un cordon avec des telles dimensions ;
- les valeurs des paramètres Tdep et WFS/TS adaptées pour réaliser ce cordon.

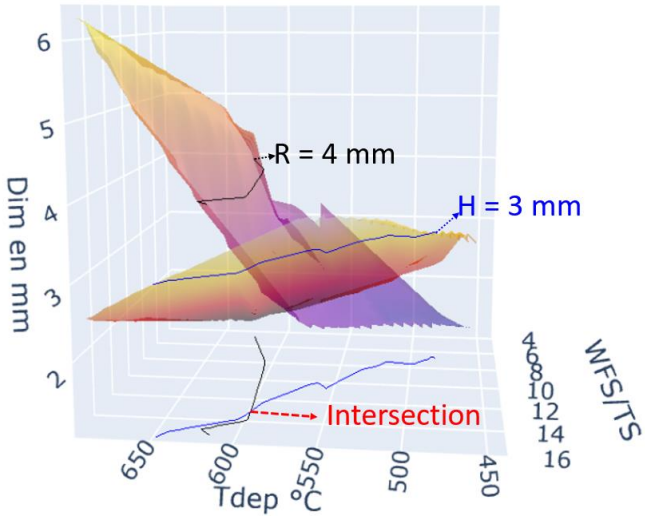

Figure 10 – Graphe Surface de Réponse de R et H en fonction de Tdep et WFS_D/TS

Par exemple, pour un objectif de R=4 mm et H=3 mm, il est possible de calculer l'ensemble des couples (Tdep, WFS/TS) permettant, chacun d'eux pris séparément, de réaliser la géométrie cible, R ou H. Ces couples de valeurs sont matérialisés sur les Figures 7 et 8 par des courbes, résultats des intersections des plans d'iso-rayon (R=4 mm) et d'iso-hauteur (H=3 mm) avec les surfaces de réponse respectives. Ces courbes sont ensuite projetées et superposées sur le plan Tdep – WFS/TS. S'il existe au moins un point d'intersection entre les courbes, alors d'après ce modèle il est possible de déposer un cordon avec les dimensions R et H souhaitées.

Sur la Figure 10 nous pouvons observer les deux graphes superposés. Les profils d'intersection de chaque graphe sont projetés sur le plan Tdep - WFS/TS, sur lequel nous pouvons observer une intersection. Dans ce cas, il est donc possible de réaliser un cordon de géométrie telle que R=4 mm et H=3 mm. Les paramètres Tdep, WFS_D/TS adaptés pour ce cordon sont les coordonnées du point d'intersection des deux courbes : Tdep = 600 °C et WFS_D/TS = 13,2. Ces valeurs sont cohérentes avec les observations au cours des expériences et simulations.

4. Discussion et Perspectives

En résumé, nous avons construit un modèle qui met en relation les dimensions d'un cordon, couple (R, H) avec les paramètres physiques (WFS_D/TS, Tdep).

Un point important doit être surligné est l'influence de certains phénomènes physiques qui modifient le comportement du procédé comme par exemple l'apparition d'une double brisure de courbe visible en Figure 10, qui illustre une vue du graphe Figure 8 dans le sens de l'axe WFS/TS :

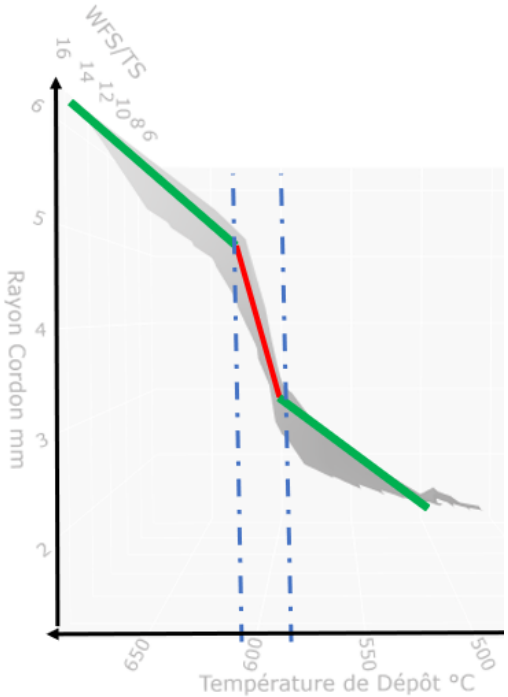

Figure 11 – Vue de profil de la surface R fonction de Tdep et WFS_D/TS

Ce changement dans le comportement du procédé peut être mis en relation avec le changement de phase du matériau utilisé. En effet, si nous étudions le diagramme de phases des alliages Al-Mg, qui correspond au type d'alliage utilisé dans nos essais :

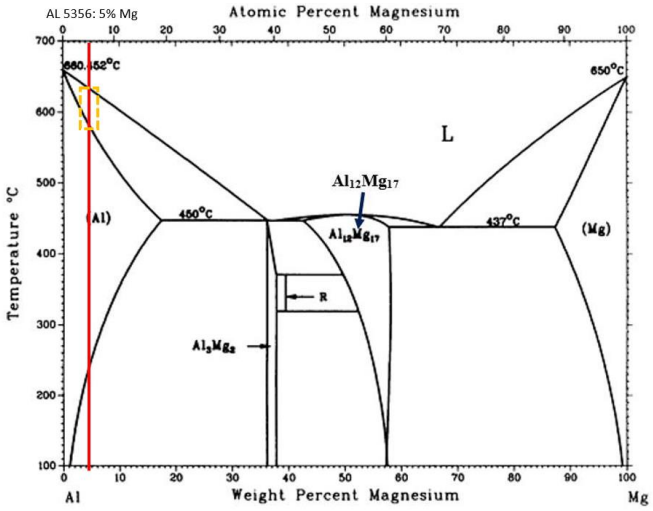

Figure 12 – Diagramme de phases alliages Al – Mg [9]

La ligne rouge verticale tracée sur la Figure 12 représente l'alliage utilisé Al 5356 à 5% de Mg. Ce matériau passe dans une phase Liquide + Solide entre 580 et 620 °C, ce qui correspond aux points de brisure de courbe vue en Figure 11.

Cette importante variation dans le rapport entre température et rayon peut mettre en doute la consistance du modèle, notamment au niveau de la faible densité de points de données dans la zone du graphe qui correspond aux températures de changement de phase.

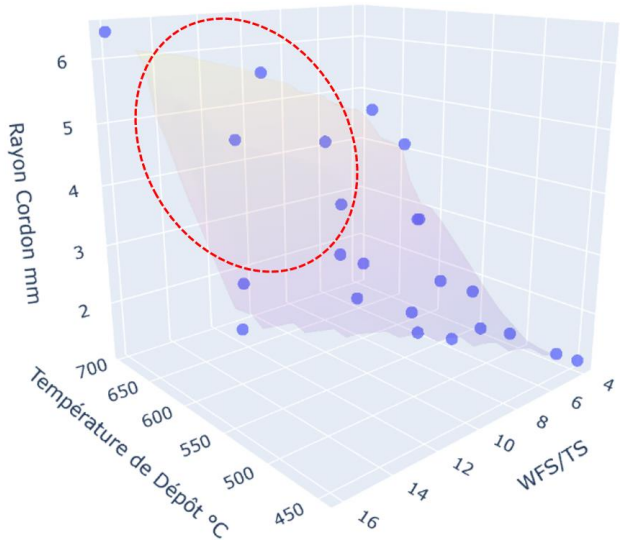

Figure 13 – Distribution des points de données du graphe Figure 7

Ce modèle doit donc tout d'abord être vérifié pour garantir que nos résultats restent cohérents. Une campagne expérimentale est prévue pour vérifier les prédictions de pilotage établies pour une géométrie (R, H) cible et pour compléter avec davantage de mesures la base de données phénoménologique.

Par la suite, le lien entre les paramètres Tdep et WFS_D/TS avec les paramètres opératoires pilotables (T_init, temps d'attente, WFS_S) et la géométrie du substrat doit être établi dans les travaux.

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans cet article font partie du projet AWESOME, financé par l'Agence Nationale de la Recherche : https://anr.fr/Projet-ANR-21-CE10-0013

REFERENCES

[1] S. Suryakumar, K.P. Karunakaran, A. Bernard, U. Chandrasekhar, N. Raghavender, D. Sharma (2011). Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing. Computer-Aided Design, Volume 43, Issue 4: p331–p344, April 2011. https://doi.org/10.1016/j.cad.2011.01.006.

[2] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, & H. Li (2015). A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM).: A Review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *31*, 101–110. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2014.08.008.

[3] A. Chergui, F. Villeneuve, N. Béraud, F. Vignat (2022). Thermal simulation of wire arc additive manufacturing: a new material deposition and heat input modelling. International Journal on Interactive Design and Manufacturing. https://doi.org/10.1007/s12008-021-00824-7

[4] S. Manokruang, (2022). Phenomenological model of thermal effects on weld beads geometry produced by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). Mechanics of materials [physics.class-ph]. Université Grenoble Alpes 2022. English. ⟨NNT : 2022GRALI058⟩.

[5] F. Rouchon (2022). Contributions à la modélisation géométrique du dépôt de matière pour l'élaboration d'un jumeau numérique du procédé WAAM. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Paris-Saclay, 2022. Français. ⟨NNT : 2022UPAST088⟩.

[6] M.S. Mohebbi, M. Kühl, and V. Ploshikhin (2020). A thermo-capillary-gravity model for geometrical analysis of single-bead wire and arc additive manufacturing (WAAM). The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 109(3), pp 877–891. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05647-6

[7] F.M. Scotti, F.R. Teixeira, L.J. da Silva, D.B. de Araújo, R.P. Reis, & A. Scotti (2020). Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique. *Journal of Manufacturing Processes*, *57*, 23–35. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.007

[8] K. Treutler, & V. Wesling (2021). The current state of research of wire arc additive manufacturing (WAAM): A review. *Applied Sciences (Switzerland)* (volume 11, issue 18). MDPI. https://doi.org/10.3390/app11188619

[9] M. Akshansh (2018). Friction Stir Welding of Dissimilar Metal: A Review. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3104223