



Méthode de qualification de stratégies de fabrication pour l'obtention de murs épais en WAAM

Alexis Claude, Sébastien Campocasso, Maxime Chalvin, Michel Demesy

► To cite this version:

Alexis Claude, Sébastien Campocasso, Maxime Chalvin, Michel Demesy. Méthode de qualification de stratégies de fabrication pour l'obtention de murs épais en WAAM. Conference Manufacturing21, Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay [ENS Paris Saclay], Oct 2022, Gif Sur Yvette, France. <hal-04011637>

HAL Id: hal-04011637

<https://hal.science/hal-04011637v1>

Submitted on 2 Mar 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.



HAL Authorization



Méthode de qualification de stratégies de fabrication pour l'obtention de murs épais en WAAM

**Alexis CLAUDE^{(a)(b)*}, Sébastien CAMPOCASSO^(a),
Maxime CHALVIN^(a), Michel DEMESY^(c)**

(a) Université de Toulon, COSMER, Toulon, France

(b) Université de Toulon, Plateforme MAQ3D, Toulon, France

(c) CEA, DAM, Valduc, 21120 Is-sur-Tille, France

**Mail : alexis.claude@univ-tln.fr*

Résumé : Les procédés de fabrication additive métallique actuellement les plus industrialisés sont ceux qui utilisent un lit de poudre, mais les dimensions de l'enceinte de fabrication restent limitées. Les procédés DED (*Directed Energy Deposition*) tels que le WAAM (*Wire and Arc Additive Manufacturing*) en sont une bonne alternative, proposant un volume de fabrication de l'ordre de plusieurs mètres cubes, de grandes vitesses de fabrication, un meilleur rendement de l'utilisation de la matière, mais ce au détriment de la complexité des pièces fabricables. De plus, il est crucial d'adapter la stratégie de fabrication selon le cahier des charges de la pièce finale afin de garantir la fabricabilité et de répondre aux exigences géométriques et mécaniques. Cette adaptation nécessite une connaissance amont des différentes stratégies utilisables et ainsi, la qualification de ces dernières s'avère être une étape indispensable. Dans le cadre de la fabrication de murs épais, cet article propose un processus de mise au point de stratégies visant à évaluer leur capacité de mise en œuvre ainsi que leurs caractéristiques mécaniques, microstructurales et géométriques. L'élaboration des pièces s'effectue selon différentes configurations, d'abord simplifiées par l'optimisation d'une simple couche, puis en tendant vers la configuration finale par la superposition de plusieurs couches. La qualification géométrique d'une stratégie de remplissage contourné a pu être réalisée grâce à l'application de cette méthode qui a permis sa mise au point sur un procédé WAAM aluminium.

Mots clés : Fabrication additive, WAAM, Parois-épaisses, Stratégies de fabrication

Introduction

Les procédés de fabrication additive métallique DED représentent une opportunité industrielle majeure en remplacement de procédés conventionnels tels que la fonderie, la forge ou l'usinage dans la masse en permettant la fabrication de pièces brutes de grandes dimensions à moindre coût (Williams et al., 2016). Cependant, la maîtrise de certains phénomènes inhérents à ces procédés demeure complexe, telle que la gestion thermique durant la fabrication qui s'avère être un des plus grands enjeux de la fabrication additive métallique. Une mauvaise gestion résultant de l'organisation spatio-temporelle des trajectoires, des paramètres de dépôt ou des temps de refroidissement peut en effet se trouver à l'origine d'un échec de fabrication, généralement traduit par un effondrement de la géométrie ou une dégradation de la santé matière. Dans un contexte industriel, nous nous sommes intéressés à la fabrication de pièces cylindriques à parois épaisses. En vue de sélectionner la stratégie de fabrication la plus adéquate, une méthode est proposée dans le but de qualifier les différentes stratégies de fabrication possibles.

Dans un premier temps, un état de l'art recense les paramètres du procédé influents en WAAM ainsi que les stratégies de fabrication usuelles. Les méthodes et techniques actuellement utilisées pour l'optimisation de paramètres en vue de fabriquer des murs épais sont ensuite mises en lumière. Ces éléments constituent une base pour notre méthodologie qui est présentée en Partie 2. Enfin, une dernière partie présente un cas d'application avec la qualification géométrique d'une stratégie de remplissage contourné.

1. Etat de l'art

1.1. Effets des paramètres du procédé en WAAM

De nombreuses études s'intéressent aux effets des paramètres du procédé WAAM sur la géométrie de cordons monocouches. Des modèles de prédiction et d'optimisation ont été développés permettant de corréler les paramètres du procédé avec la géométrie obtenue (M. Mukherjee et al., 2015 ; F. Youheng et al., 2017 ; A. S. Yildiz. et al., 2020 ; Xiong et al., 2013). Il en ressort que la largeur et la hauteur de dépôt peuvent être diminuées en diminuant la vitesse d'apport de fil (WFS) et en augmentant la vitesse d'avance (TS), tandis que la diminution de la tension électrique a tendance à engendrer une réduction de la largeur de dépôt ainsi qu'une augmentation de sa hauteur. Dans le cas de superposition de cordons, des travaux mettent en avant l'influence de la température inter-couches sur la géométrie du cordon en montrant que plus cette température est élevée, plus la largeur du cordon déposé est importante tandis que sa hauteur diminue (Kozamernik et al., 2020 ; Köhler et al., 2020). D'autres travaux le montrent également à travers l'analyse géométrique de cylindres fabriqués à partir de différents seuils de température inter-couches (Chalvin et al., 2021). Il est aussi montré que plus le temps de dépôt par couche est long, plus les temps de refroidissement inter-couches sont importants et dans ce cas, le cordon suivant peut subir une modification de morphologie due à une modification des conditions thermiques de dépôt (Chalvin et al., 2021 ; Thanh Hoang Vo. et al., 2021).

1.2. Stratégies de fabrication en procédés DED

La fabrication de pièces en fabrication additive DED nécessite la définition d'une trajectoire permettant l'organisation spatio-temporelle du dépôt de matière visant au

remplissage de la pièce à fabriquer. Cette organisation, aussi appelée « stratégie de remplissage », doit nécessairement être adaptée à la géométrie de la pièce à fabriquer au risque de générer des manques de matière dans la pièce si la géométrie du cordon déposé n'est pas adéquate (D. Ding. et al., 2015). Il existe différentes stratégies de remplissage, dont les plus communes sont le contour offset, le remplissage contourné ou encore le cordon continu (D. Ding. et al., 2015 ; Querard, 2019), illustrées sur la Figure 1. La définition de cette stratégie doit également prendre en compte l'impact thermique sur la géométrie en cours de fabrication, au risque de conduire à une distorsion thermique de la pièce (Yu et al., 2011) et ainsi engendrer la non-conformité de la pièce voire un échec de fabrication. Il est alors possible de décliner ces stratégies selon différentes configurations, notamment en faisant varier l'ordonnancement du dépôt ou encore le sens de parcours pour modifier le comportement thermique du cordon déposé (Chergui et al., 2021). Dans le cas de la superposition de couches, si le paramètre de hauteur de couche défini est constant et n'est pas représentatif de la réalité, cette distorsion peut alors engendrer des collisions entre la pièce et l'outil de dépôt. Pour pallier ce problème, des travaux ont été réalisés permettant l'adaptation de la trajectoire en cours de fabrication en fonction de la géométrie réelle mesurée de la pièce (Garmendia et al., 2020).

1.3. Méthodologies de mise au point de murs épais en procédés DED

Si la fabrication de pièces à parois minces peut être aisément optimisée voire rendue possible grâce à la maîtrise de la température durant la fabrication (Querard, 2019 ; Chalvin et al., 2021), il en est autrement concernant la fabrication de pièces massives. Le comportement thermique du bain de fusion étant dépendant de la typologie de trajectoire ainsi que du volume de matière déjà déposé sur le substrat (Querard, 2019 ; Chalvin et al., 2021), il est complexe de conserver une température adéquate au cours de la fabrication permettant d'obtenir une géométrie conforme du cordon déposé. L'utilisation de méthodologies pour la fabrication de ces pièces s'avère alors nécessaire. Peu de références scientifiques sont relatives à la fabrication de mur épais en WAAM. Parmi elles, une propose une méthode en deux étapes visant à déterminer les paramètres optimaux de fabrication dans le cas de murs monocordons (Querard, 2019). Dans un premier temps, il s'agit d'observer la géométrie de cordons simples monocouches pour plusieurs WFS et TS et ainsi retenir l'optimale. Le jeu de paramètres retenu est alors réutilisé lors d'une seconde étape qui consiste à superposer les cordons dans le but de déterminer une valeur moyennée de la hauteur de couche réelle. L'utilisation de cette dernière permettra la génération de trajectoires conformes à la géométrie réelle du cordon et permettra ainsi des conditions de dépôt constantes tout au long de la fabrication. De plus, il est nécessaire de prendre en compte le comportement thermique lors du dépôt de la première couche qui constitue une étape de régime transitoire, celui-ci étant fortement lié au volume du substrat, à sa morphologie, à son matériau et même à son état de surface. Il peut alors être nécessaire d'opter pour un préchauffage de celui-ci ou encore de modifier spécifiquement les paramètres de dépôt (Querard, 2019 ; Chalvin et al., 2021).

2. Méthode de mise au point de stratégies visant à leur qualification

2.1. Définition des différentes configurations de stratégies de fabrication

Dans le cadre d'une démarche de qualification, il est nécessaire de distinguer les différentes déclinaisons de stratégies de fabrication existantes. Une proposition de cartographie, non exhaustive, des différentes configurations est présentée à la Figure 1. La définition d'une configuration s'effectue en partant de la typologie globale (à gauche) jusqu'aux paramètres de trajectoires spécifiques (vers la droite), qui sont fonctions de la géométrie de pièce à fabriquer. Ce découpage permet, lors des étapes de mise au point, de faire varier les paramètres liés à la stratégie le plus indépendamment possible.

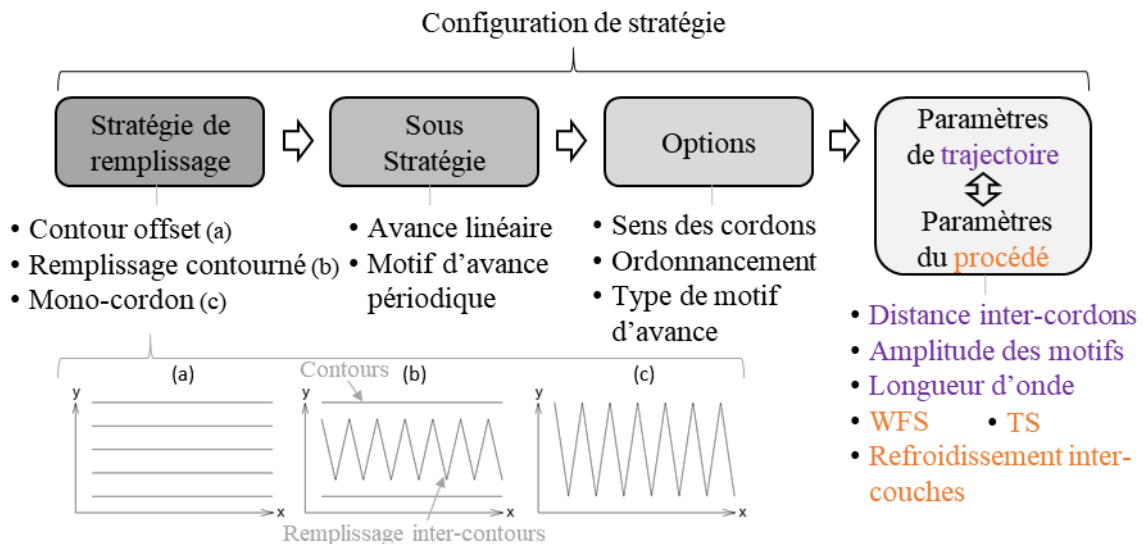


Figure 1 : Cartographie des différentes configurations de stratégies possibles

2.2. Prérequis

Dans une démarche de qualification de stratégie, deux éléments doivent être définis préalablement. D'une part, le choix de la stratégie à qualifier associée à une sous-stratégie (étape 1.1 de la Figure 4) ; ce choix permet de définir la typologie de trajectoire à mettre en œuvre lors de la fabrication de murs épais (Figure 1). D'autre part, il est nécessaire de définir les paramètres de dépôt du cordon dit nominal (étape 1.2 de la Figure 4). Ceux-ci serviront de paramètres initiaux lors des étapes de mise au point de la stratégie et pourront être optimisés. La définition de ce cordon de base dépend notamment des paramètres réglables sur la machine de fabrication, du matériau ou encore de la largeur de mur à fabriquer. Dans cette étude, nous définissons un mur épais tel que sa largeur soit de trois à cinq fois la largeur du cordon nominal (monocordon avec une avance linéaire). Au-delà, l'opération s'apparente à du remplissage de pièce à pleine densité et la présente méthodologie ne sera probablement pas adaptée.

2.3. Mise au point de la stratégie

Une fois les éléments prérequis définis, la stratégie peut être mise au point. En appui sur les méthodes existantes, celle-ci s'organise selon plusieurs étapes décrites dans les parties suivantes.

2.3.1. Mise au point en configuration monocouche

L'état de l'art met en avant l'intérêt de définir un jeu de paramètres spécifique pour la première couche (Querard, 2019). La première étape consiste alors à la mise au point de la stratégie dans une configuration monocouche, permettant entre autre l'optimisation des paramètres qui serviront pour les autres étapes (étape 2.1 de la Figure 4). Il est proposé dans un premier temps d'effectuer la mise au point sur une couche linéaire, d'une part pour minimiser la place requise sur le substrat lors de la phase expérimentale, d'autre part pour pouvoir fabriquer par la suite un mur linéaire dans le cadre de la caractérisation mécanique ou microstructurale (éprouvettes de traction par exemple). Le processus de mise au point est présenté à la Figure 2. L'objectif est d'obtenir une géométrie de cordon linéaire monocouche uniforme grâce à l'optimisation des paramètres de trajectoire (Figure 1) sur la base des paramètres de dépôt du cordon nominal. Les critères considérés sont les suivants : hauteur de cordon, largeur, régularité, planéité et mouillage sur le substrat. Un premier choix de combinaison d'options associées à la stratégie doit être effectué. Un plan d'expériences est alors mis en œuvre et permet la fabrication d'une première couche de mur. Trois cas de figure se présentent alors à l'issue du contrôle géométrique des murs. Premièrement, au moins un mur fabriqué présente une géométrie correcte : ses paramètres de trajectoire et de dépôt sont retenus et le processus est terminé. Deuxièmement, aucun mur n'est correct mais toutes les combinaisons d'options n'ont pas été expérimentées avec une même paramétrie de dépôt : le processus redémarre avec la mise en œuvre d'une nouvelle combinaison d'options. Troisièmement, aucun mur ne présente de géométrie conforme et toutes les combinaisons d'options ont été expérimentées avec une même paramétrie de dépôt : le processus redémarre avec de nouveaux paramètres de dépôt en utilisant la combinaison d'options qui a apporté les meilleurs résultats géométriques.

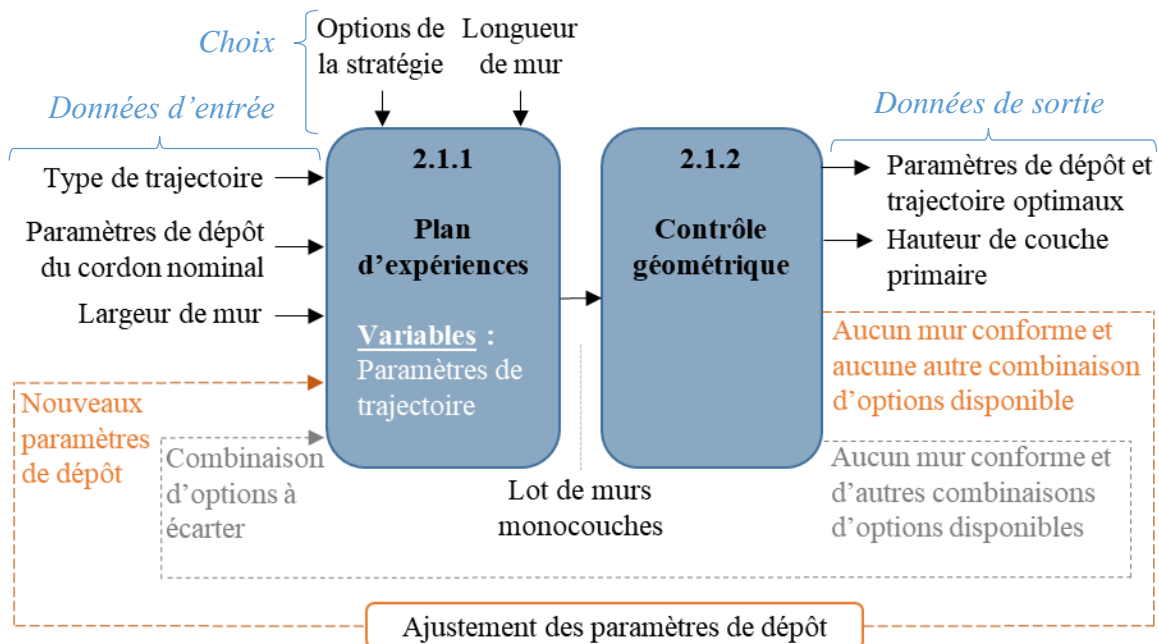


Figure 2 : Processus de mise au point en configuration linéaire monocouche

2.3.2. Mise au point en configuration multicouches d'étalonnage

L'obtention d'un mur épais nécessite une mise au point de la stratégie en configuration linéaire multicouches (étape 2.2 de la Figure 4). L'objectif est de définir les paramètres de fabrication optimaux des couches supérieures à la première (Figure 3). Pour ce faire, il est proposé de réaliser les expérimentations sur des murs comportant un nombre de couches réduit (5 à 10 par exemple). D'une part, cela doit permettre la fabrication d'un mur dit « d'étalonnage », permettant de connaître la hauteur de couche réelle moyennée et qui par le nombre de couches d'étalonnage se doit d'être représentative ; d'autre part, de manière à limiter le temps d'expérimentation et la matière consommée.

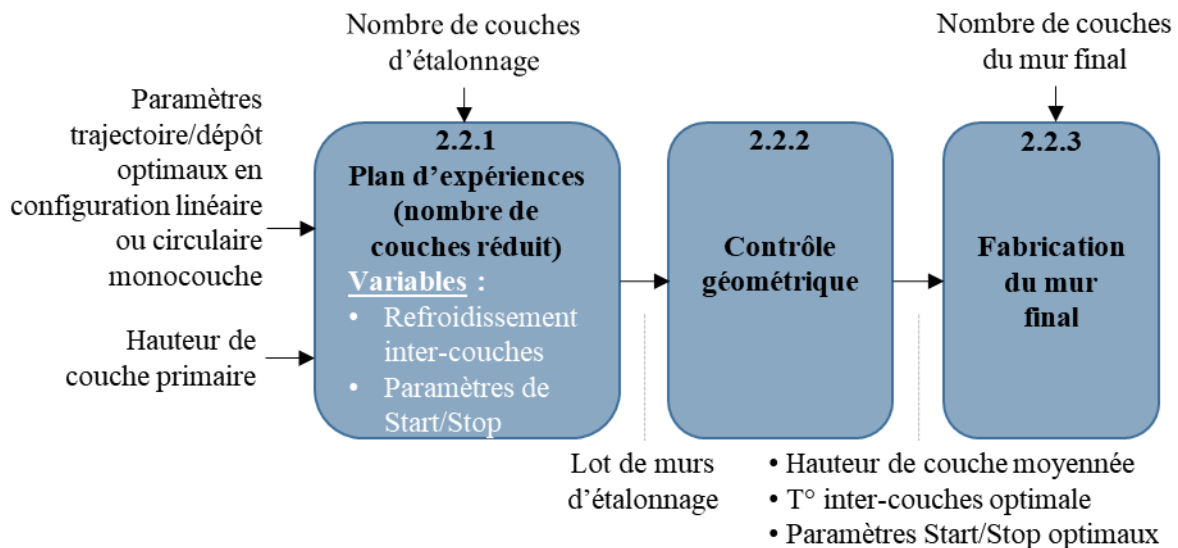


Figure 3 : Processus de mise au point en configuration linéaire multicouches

D'après les travaux de l'état de l'art, les gradients de température lors du soudage d'un cordon augmentent au fil des couches déposées, à mesure que la capacité thermique massique du système augmente. Les cordons deviennent alors moins larges et plus hauts (Partie 1.1). De ce fait, il est proposé de mettre en œuvre un plan d'expériences utilisant les paramètres de fabrication obtenus en configuration linéaire monocouche ainsi que la hauteur de couche mesurée et faisant varier la température inter-couches selon un temps de refroidissement inter-couches asservi. Celui-ci doit alors permettre la maîtrise de l'énergie thermique dans le système, limitant ainsi les gradients de température lors du dépôt et permettant l'obtention d'une géométrie conforme (selon les critères considérés et cités à la Partie 2.3.1).

2.3.3. Mise au point en configuration multicouches circulaire

Il est également proposé de réaliser une qualification des stratégies à partir de cylindres épais. Cet élément de géométrie s'avère intéressant car il permet d'une part des caractérisations géométriques telles que la cylindricité ou encore la symétrie du mur lors de trajectoires courbes, utiles pour la fabrication de pièces non linéaires ; d'autre part d'évaluer l'impact de la typologie de trajectoire (linéaire ou circulaire) sur les caractéristiques mécaniques et métallurgiques. L'élaboration d'un cylindre se base sur les étapes vues précédemment. Dans le but d'assurer une géométrie correcte au niveau de la jonction de la trajectoire, il est proposé de faire varier complémentirement les paramètres de départ et arrêt de dépôt lors de la phase 2.3, Figure 4.

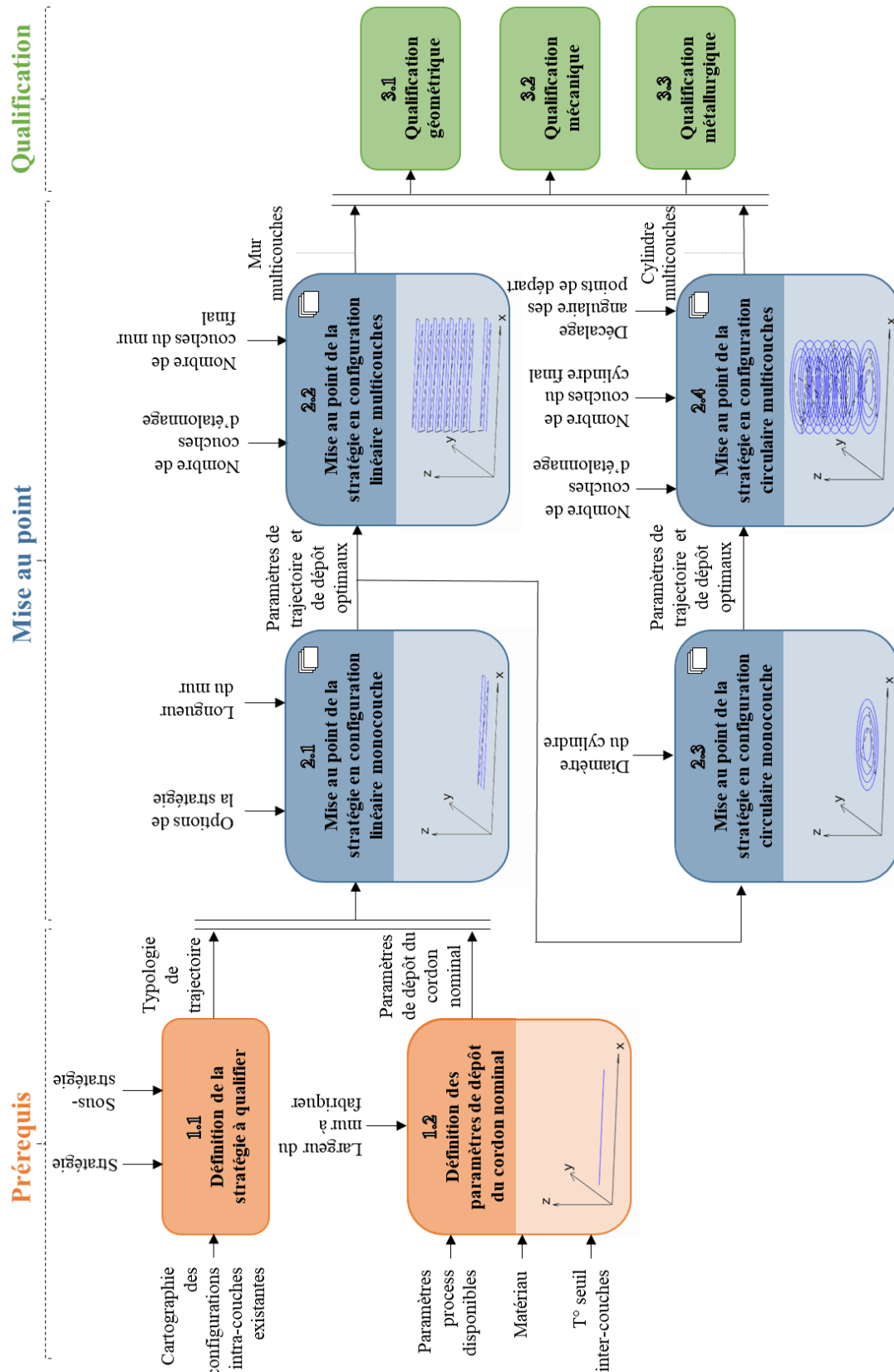


Figure 4. Méthode globale proposée visant à la qualification de stratégies

3. Application de la méthode

La méthode a été appliquée à différentes stratégies. Seule la stratégie de remplissage contourné avec un motif d'avance sinusoïdal est présentée. La fabrication est réalisée avec un bras robotisé 6-axes Fanuc ArcMate 120iC associé à un vireur 2-axes et à un

contrôleur R-30iB Plus. Le matériau utilisé pour le dépôt est un alliage d'aluminium 5183 déposé via un générateur CMT Fronius TPSi 500. Le substrat est un alliage d'aluminium 5086 d'épaisseur 4 mm. Un pyromètre Optris CTlaser 3ML CF3 est utilisé pour le contrôle de la température inter-couches.

3.1. Mise au point de la stratégie de remplissage contourné

Lors de la mise au point en configuration monocouche, les différents essais de combinaisons d'options n'ont pas permis d'apporter des résultats géométriques corrects en se servant de la paramétrie de dépôt nominale. L'hypothèse de l'échec dans le cas d'un cordon de remplissage inter-contours (Figure 1) est la suivante : au début de la couche, l'énergie thermique (régie par les paramètres de dépôt du départ d'arc), est suffisante à l'endroit du dépôt. Par la suite celle-ci n'est plus suffisante, conduisant à un refroidissement rapide du dépôt au niveau des cordons de contours et engendrant une attirance successive de l'arc sur ceux-ci. En fin de couche, la saturation thermique du système permet à cette énergie d'être à nouveau suffisante. Alors, comme le propose la méthode, un changement de paramétrie de dépôt a été effectué pour la trajectoire de remplissage. En augmentant légèrement le WFS, l'énergie nécessaire pour la conservation d'un bain de fusion inter-contours a été atteinte et a permis la conformité des critères géométriques attendus (Figure 5). La mesure de la planéité a été établie grâce à un scan de la couche ainsi qu'un post-traitement sur Matlab. Seule la zone centrale du cordon est considérée (Figure 6) afin de se rapprocher d'un régime stabilisé où la géométrie du cordon varie peu, contrairement aux zones de départ et d'arrêt de dépôt (Figure 5).

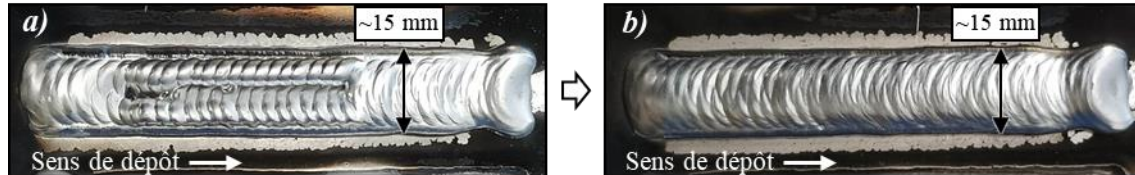


Figure 5 : Stratégie avant et après mise au point, respectivement a) et b)

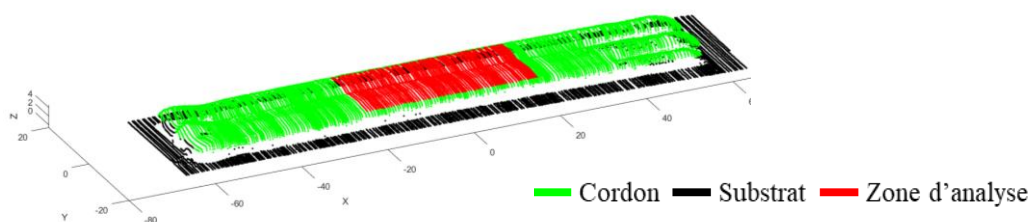


Figure 6 : Mise en évidence de la zone considérée pour la mesure de la planéité

Après avoir mis au point la stratégie dans une configuration monocouche circulaire en optimisant les paramètres de départ et arrêt de dépôt, un étalonnage de la hauteur de couche a été réalisé en fabriquant des cylindres composés de cinq couches. Comme le propose la méthode (Partie 2.3.2), un plan d'expériences a été réalisé faisant varier la température inter-couches autour d'une valeur nominale de 160°C (Chalvin et al., 2021). La Figure 7 présente trois cylindres fabriqués avec des températures inter-couches différentes. Il semblerait que plus cette dernière est élevée, plus la géométrie de couche se stabilise rapidement (notamment la planéité), ce grâce à une énergie thermique qui serait suffisante. A cette étape, la difficulté réside dans le fait de définir un nombre correct

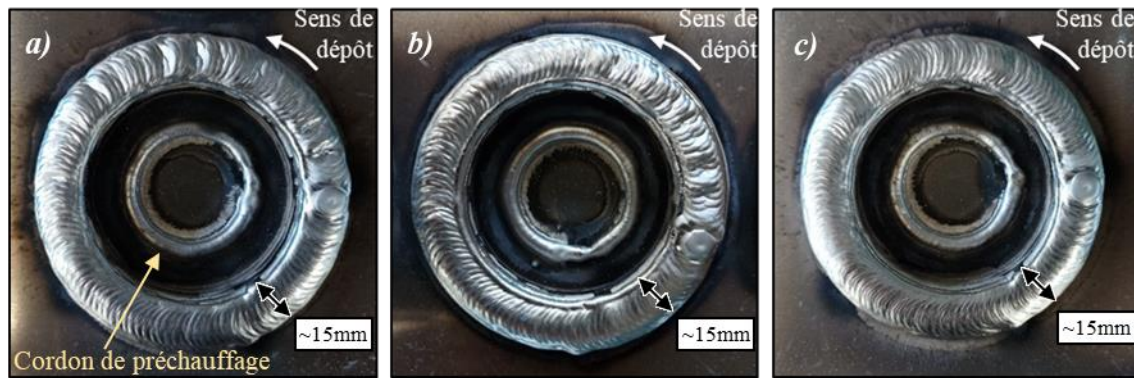


Figure 7. Cylindres de 5 couches, \varnothing nominal 100mm, Stratégie de remplissage périodique contourné avec motif « Weave Sine » (Fanuc) à différentes températures inter-couches : a) 120°C ; b) 160°C ; c) 200°C

de couches d'étalonnage. Celui-ci doit correspondre à un stade de régime thermique stabilisé afin que la dernière couche soit représentative des couches supérieures. Le comportement thermique dépend notamment du substrat, du système de bridage, de la largeur du cylindre ou encore de son diamètre (Chalvin et al., 2021).

3.2. Qualification géométrique

Trois critères ont été évalués dans le cadre de la qualification géométrique de la stratégie : les défauts de cylindricité intérieure et extérieure, les surépaisseurs moyennes intérieure et extérieure ainsi que le taux de déchet de matière pour l'obtention d'un cylindre épais parfait (surépaisseur mesurée). Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un bras de mesure Römer AbsoluteArm équipé d'un palpeur sphérique de diamètre 6 mm. Les résultats sont présentés dans le Tableau 1. Le défaut de cylindricité obtenu est cohérent avec les travaux précédemment menés (Chalvin et al., 2021) pour ce type de diamètre. Les surépaisseurs intérieure et extérieure montrent que la stratégie propose une bonne symétrie latérale du mur lors d'une trajectoire courbe. Le taux de déchet, représentant la différence entre le cylindre brut et le cylindre épais parfait est de 7,38%.

Tableau 1 : Résultats obtenus suite au contrôle géométrique

Défaut de cylindricité (mm)		Surépaisseur moyenne par rapport au cylindre épais parfait (mm)		Taux de déchet pour l'obtention d'un cylindre épais parfait
Intérieur	Extérieur	Intérieure	Extérieure	
0,6714	0,8492	0,5894	0,5228	7,38%

4. Conclusion

Afin de pouvoir réaliser des qualifications géométriques, mécaniques ou encore microstructurales de stratégies de fabrication à partir de murs épais, une méthode de mise au point de ces stratégies a été élaborée et appliquée. Cette méthode propose tout d'abord une cartographie des différentes configurations de stratégies existantes, permettant ainsi de faciliter la définition de la stratégie d'étude en distinguant différents modes de mise en œuvre. Les paramètres optimaux de dépôt et de trajectoire pour chaque stratégie sont définis en considérant deux configurations : le dépôt de la première couche qui est à même le substrat ; et le dépôt des couches supérieures. Dans ce dernier cas, il est proposé d'une part de réaliser un étalonnage de la hauteur de couche permettant de garantir une

cohérence entre la trajectoire et le mur en cours de fabrication ; d'autre part, d'ajuster la température inter-couches en vue de garantir un apport suffisant d'énergie thermique au cours de la fabrication et ainsi de conserver une géométrie conforme. La méthode propose d'effectuer la qualification géométrique à partir de cylindres épais afin de se rapprocher au plus près des cas industriels. Dans ce cadre, cette méthode a été appliquée et a permis la mise au point de différentes stratégies de fabrication visant à la fabrication de cylindres épais de diamètre 100 mm. A ce jour, il n'est pas possible d'affirmer la pertinence de cette méthode dans le cas de la fabrication de pièces de grandes dimensions où l'accumulation d'énergie thermique dans le système serait plus élevée du fait d'un temps accru du dépôt. Il serait alors intéressant d'appliquer la méthode sur différentes tailles et formes de pièces afin d'en définir les limites. Il serait également pertinent de faire varier la température inter-couches en fonction de la couche fabriquée, plutôt que de se baser sur un résultat moyen satisfaisant la conformité géométrique d'un ensemble de couches.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier la métropole Toulon Provence Méditerranée (TPM) et le Conseil Départemental du Var pour leur soutien financier respectivement dans les projets ROBOWAM et ROBWELD. Les auteurs souhaitent aussi remercier l'IUT de Toulon pour la mise à disposition des locaux et son soutien financier.

Références

- Chalvin, M., Claude, A., Campocasso, S., Hugel, V., "Gestion de la température couche-par-couche pour la fabrication additive WAAM", *Conférence Manufacturing'21*, p.10, 2021.
- Chergui, A., "Simulation Based deposition Strategies Evaluation and Optimization in Wire Arc Additive Manufacturing", *Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes*, 2021.
- Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D. et Li, H., "A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures", *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 34, pp. 8-19, 2015.
- Dinovitzer, M., Chen, X., Laliberte, J., Huang, X. and Frei, H., "Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure," *Addit. Manuf.*, vol. 26, pp. 138–146, 2019.
- Garmendia, I., Flores, J., Madarieta, M., Lamikiz, A., Uriarte, L.G, Soriano, C., "Geometrical control of DED processes based on 3D scanning applied to the manufacture of complex parts", *Procedia CIRP*, vol. 94, pp. 425-429, 2020.
- Köhler, M., Hensel, J., Dilger, K., "Effects of thermal cycling on Wire And Arc Additive Manufacturing of al-5356 components", *Metals*, vol.10, p. 952, 2020.
- Kolahan, F. and Heidari, M., "A New Approach for Predicting and Optimizing Weld Bead Geometry in GMAW", *Int. J. Mech. Syst. Eng.*, vol. 2, pp. 138-142, 2010.
- Kozamernik, N., Bračun, D., Klobčar, D., "WAAM system with interpass temperature control and forced cooling for near-net-shape printing of small metal components", *J. Adv. Manuf. Technol.*, vol.110, pp. 1955–1968, 2020.
- Mukherjee, M. and Pal, T. K., "Evaluation of Correlations between DPGMAW Process Parameters and Bead Geometry", *Welding Journal*, vol. 94, pp. 265-279, 2015.
- Querard, V., "Réalisation de pièces aéronautiques de grandes dimensions par fabrication additive WAAM", *Thèse de doctorat, École centrale de Nantes*, 2019.
- Vo, T.H., Grandvallet, C., Vignat, F., "Les éléments importants pour fabriquer des pièces massives par technologie WAAM", *17ème colloque national S-mart*, 2021.
- Xiong, J., Zhang, G., Hu, J. and Li, Y., "Forecasting process parameters for GMAW based rapid manufacturing using closed-loop iteration based on neural network", *J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 69, pp. 743–751, 2013.
- Yildiz, A. S., Davut, K., Koc, B. and Yilmaz, O., "Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: Study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics", *J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 108, no. 11-12, pp. 3391–3404, 2020.
- Youheng, F., Guilan, W., Haiou, Z. and Liye, L., "Optimization of surface appearance for wire and arc additive manufacturing of Bainite steel", *J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 91, no. 1-4, pp. 301–313, 2017.
- Yu, J., Lin, X., Ma, L., Wang, J., Fu, X., Chen, J., Huang, W., "Influence of laser deposition patterns on part distortion, interior quality and mechanical properties by laser solid forming (LSF)", *Mater. Sci. Eng.*, vol. 528, pp.1094-1104, 2011.