HAL
open science

Gestion de la température couche-par-couche pour la fabrication additive WAAM

Maxime Chalvin, Alexis Claude, Sébastien Campocasso, Vincent Hugel

To cite this version:

Maxime Chalvin, Alexis Claude, Sébastien Campocasso, Vincent Hugel. Gestion de la température couche-par-couche pour la fabrication additive WAAM. Conférence Manufacturing'21, Jun 2021, Angers (Online), France. pp.10. hal-03267645

HAL Id: hal-03267645

https://hal.science/hal-03267645

Submitted on 22 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.

Gestion de la température couche-par-couche pour la fabrication additive WAAM

Maxime CHALVIN[(a)(b)*], Alexis CLAUDE[(b)(c)], Sébastien CAMPOCASSO[(b)], Vincent HUGEL[(b)]

(a) SEGULA Technologies, 19 rue d'Arras, 92000 Nanterre

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

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

** Correspondant : maxime.chalvin@univ-tln.fr*

Résumé : La fabrication additive WAAM, basée sur un procédé de soudage Fil-Arc, permet l'obtention de pièces brutes métalliques de grandes dimensions à des conditions économiques intéressantes pour de petites séries. En revanche, la qualité des pièces dépend fortement de la gestion de la température au cours de la fabrication. En effet, le mode de dépôt implique un transfert de chaleur important à la pièce et il peut être nécessaire de procéder à des arrêts du dépôt pour permettre son refroidissement. Dans le but de déterminer l'influence de la chaleur sur la qualité géométrique de pièces de révolution à parois minces, une méthode de mesure de la température in-situ via l'utilisation d'un pyromètre ainsi qu'une stratégie de gestion de la température inter-couches est proposée. Les méthodes de mesure et de gestion de la température inter-couches sont appliquées pour la fabrication de cylindres à parois minces de différents diamètres nominaux. Le contrôle géométrique de ces derniers permet d'évaluer l'impact du diamètre sur la qualité géométrique à iso-conditions de fabrication. Le matériau étudié est un alliage d'aluminium 5183 déposé à l'aide d'une source CMT robotisée. La méthode de mesure et de gestion de la température inter-couches proposée permet ainsi de garantir le dépôt de chaque couche dans des conditions thermiques similaires, dans le but de maîtriser au mieux les conditions opératoires de fabrication.

Mots clés : Fabrication additive, WAAM, Température, Parois minces.

Introduction

La fabrication additive métallique par dépôt de fil à l'arc (*Wire and Arc Additive Manufacturing,* WAAM) représente un potentiel industriel majeur en permettant la fabrication de pièces de grandes dimensions à moindre coût en remplacement de procédés conventionnels tels que la fonderie, la forge ou l'usinage dans la masse (Williams et al., 2016), seules les surfaces fonctionnelles restant à usiner.

En revanche, le transfert de chaleur durant le dépôt peut avoir un impact sur la morphologie du cordon déposé, pouvant aller jusqu'à l'effondrement de la pièce. Des distorsions thermiques peuvent aussi apparaître, tout comme une hétérogénéité de la microstructure due au cyclage thermique (Bai et al., 2016). Dans le cadre de cet article, seul l'impact sur la qualité géométrique des pièces est étudié.

Cet article propose une méthode de mesure in-situ et de gestion de la température entre le dépôt de deux couches consécutives pour la fabrication de géométries à parois minces (ie. monocordons) en alliage d'aluminium. Ainsi, le temps de pause nécessaire au refroidissement de la pièce jusqu'à un certain seuil de température est établi couche par couche, permettant la gestion de la température durant la fabrication. Dans la suite de l'article, la Partie 1 présente un état de l'art à propos de l'impact de la gestion de la chaleur de la pièce sur sa géométrie durant la fabrication additive WAAM. La Partie 2 présente le matériel expérimental utilisé, tandis que la Partie 3 détaille les expérimentations mises en place pour évaluer la méthode proposée de mesure de température inter-couches. Enfin, la Partie 4 présente les résultats expérimentaux obtenus.

1 Etat de l'art

1.1 Impact de la chaleur sur la qualité géométrique de la pièce

Si la quantité de chaleur transmise à la pièce durant le dépôt a un impact sur sa qualité métallurgique (Bai et al., 2016), la géométrie de celle-ci peut aussi être affectée. La morphologie du cordon peut varier en fonction de la température inter-couches et sa géométrie peut s'en trouver dégradée (Geng et al., 2017). De plus, une accumulation de chaleur trop importante peut aussi conduire à une distorsion thermique de la pièce en cours de fabrication (Yu et al., 2011). Si cette distorsion peut entraîner une pièce non conforme d'un point de vue géométrique, la modification de la forme de la pièce en cours de dépôt peut conduire à un échec de fabrication : le décalage du point de dépôt réel par rapport au point de dépôt programmé dans la machine de fabrication peut conduire à une impossibilité de dépôt, notamment si l'arc ne peut être créé dans le cas du WAAM. Ainsi, la gestion de la température inter-couches est essentielle. De plus, (Wu et al., 2017) ont montré que l'utilisation d'un temps de pause inter-couches constant engendre une accumulation de chaleur dans la pièce durant la fabrication, rendant impossible la maîtrise de la température inter-couches. Cette accumulation de chaleur modifie alors la forme du cordon déposé, affectant l'adéquation entre la trajectoire de fabrication et la forme de la pièce fabriquée. Ainsi, (Kozamernik et al., 2020) et (Köhler et al., 2020) montrent que plus la température inter-couches est élevée, plus la largeur du cordon déposé est importante tandis que sa hauteur diminue. Il est alors nécessaire de maîtriser cette température de manière à pouvoir générer la trajectoire de fabrication avec des hauteurs et largeurs de cordons connues et maîtrisées. La température inter-couches moyenne relevée se situe aux alentours de 150 °C pour un alliage d'aluminium (Geng et al., 2017).

1.2 Estimation du champ de température à partir de simulations numériques

Afin de déterminer la température inter-couches durant la fabrication, il est possible de simuler numériquement le dépôt WAAM. La prédiction de cette température durant le dépôt permet de pré-déterminer le temps de pause nécessaire

entre le dépôt de deux couches consécutives de manière à maîtriser la température réelle du dernier cordon déposé avant la reprise du dépôt. En plus de donner des indications concernant la température inter-couches, la simulation thermique du dépôt permet l'estimation de la répartition de chaleur au sein de la pièce durant la fabrication (Xiong et al., 2017). Cette indication permet d'établir un historique thermique, qui peut alors servir à la sélection de différents paramètres opératoires tels que la température de préchauffage du substrat (Xiong et al., 2017), la stratégie de fabrication (Chergui et al., 2019) ou encore la paramétrie de dépôt (Cadiou et al., 2019). Cependant, la simulation numérique du procédé WAAM est difficile au vu de tous les phénomènes physiques mis en jeu, notamment métallurgiques, hydrauliques et magnétiques (Cadiou et al., 2019). Ainsi, la complexité de modélisation rend les résultats éloignés du comportement réel (Cadiou et al., 2019; Xiong et al., 2017) tout en présentant des temps de calcul très élevés (Cadiou et al., 2019; Chergui et al., 2019).

1.3 Méthodes de mesure de température in-situ

Afin de pallier aux défauts de la simulation numérique, des méthodes de mesure de température in-situ ont été mises au point. Ces techniques utilisent des appareils de mesure tels que des thermocouples (Chergui et al., 2019; Xiong et al., 2017), des caméras thermiques (Chabot et al., 2018) ou encore des pyromètres (Köhler et al., 2020; Kozamernik et al., 2020; Wu et al., 2017). Etant donné leur propriété de mesure par contact, l'emploi de thermocouples pour la mesure de température en cours de fabrication se fait essentiellement via des sondes liées au substrat. Ainsi, l'information désirée, soit la température de la dernière couche déposée, n'est pas disponible et ne peut qu'être extrapolée de celle mesurée, limitant la précision de ce type de mesure. Afin d'avoir une vision globale de la température de la pièce, il est possible d'utiliser une caméra thermique, donnant alors l'indication du champ de température dans la pièce (Chabot et al., 2018). En revanche, il reste difficile, voire impossible, d'avoir une mesure précise de la température (Bayle and Doubenskaia, 2008). Ainsi, la solution du pyromètre est privilégiée, de par sa précision de mesure et son faible coût. Cependant seule une zone restreinte de la pièce est mesurable via le pyromètre et n'offre donc pas la vision globale permise par l'utilisation d'une caméra thermique ou par la simulation numérique. C'est pourquoi ce dispositif est souvent déplacé en même temps que l'outil de dépôt de manière à pouvoir être pointé sur un point précis. De plus, étant donné que le principe de mesure du pyromètre repose sur l'émissivité du matériau déposé, il est nécessaire que la surface soit correctement orientée et que le point de mesure soit exempt de suies, oxydations ou autres afin d'avoir une mesure fiable (Wu et al., 2017).

Relativement à l'état de l'art proposé précédemment, les contributions principales de cet article sont :

- Une méthode de mesure in-situ de la température inter-couches à l'aide d'un pyromètre infrarouge,
- L'évaluation de la méthode de mesure proposée par le dépôt et la mesure géométrique de cylindres de différents diamètres.

2 Matériel expérimental

Dans le but de procéder aux essais expérimentaux, la cellule de fabrication additive ROBOWAM de l'Université de Toulon a été utilisée. Cette cellule, visible à la

Figure 1, est constituée d'un bras robotisé 6-axes Fanuc ArcMate 120*i*C, associé à un vireur 2-axes et à un contrôleur R-30*i*B Plus, et d'un générateur CMT Fronius TPSi 500. Le dispositif de mesure de température utilisé est un pyromètre Optris CTlaser 3MH1 CF3, cf. Figure 3.

2.1 Configuration du dispositif de dépôt

Le matériau utilisé est un alliage d'aluminium 5183 sous forme de fil de diamètre 1.2 mm, déposé à l'aide du générateur CMT sur une tôle substrat d'épaisseur 4 mm constituée d'alliage d'aluminium 5086. La paramétrie de dépôt utilisée a été choisie de manière à maximiser la constance de la morphologie du cordon lors du dépôt de couches circulaires. Ainsi, deux jeux de vitesse d'apport de fil (WFS) et de vitesse d'avance (TS) sont utilisés pour le régime continu du dépôt et sont regroupés dans le Tableau 1 : le premier (P1) a été développé pour le dépôt du premier cordon sur le substrat et le second (P2) pour l'empilement des cordons suivants. Le gaz d'inertage utilisé est de l'argon pur à 99.9 % à un débit de 15 L/min.

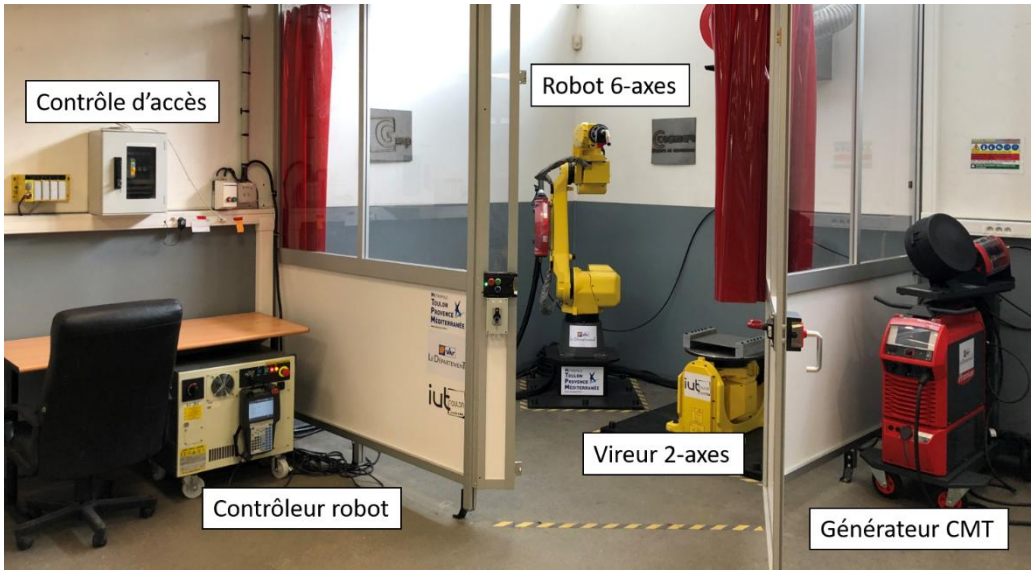


Figure 1 : Cellule de fabrication additive multi-axes ROBOWAM.

Tableau 1 : Paramétries pour le régime continu de dépôt.

	WFS (m/min)	TS (cm/min)	Hauteur couche (mm)
P1	6.5	55	3.39
P2	5	55	2.2

2.2 Configuration du dispositif de mesure

Afin que la mesure ne soit pas bruitée par l'émissivité des matériaux constituant la torche de soudage et qu'il soit protégé des projections, le pyromètre a été monté en bout de l'axe 5 du robot, via un dispositif de fixation utilisant des points d'attache disponibles sur le robot (Figure 3). Ainsi, un modèle géométrique inverse du robot ne considérant que cinq axes a été utilisé de manière à piloter celui-ci durant les cycles de mesure. La distance de travail du pyromètre est de 200 mm pour une taille de spot de 0.7 mm. La plage de température mesurable est de 150°C à 1000°C avec une précision annoncée par le fabricant de ± (0.3% de la mesure + 2 °C). Pour obtenir des mesures les plus précises possibles, le pyromètre a été étalonné à l'aide d'un cordon de référence dont l'émissivité a été mesurée pour différentes températures. Enfin, une

carte Arduino équipée de relais est utilisée de manière à interfacer le pyromètre avec le contrôleur du robot. Ce dispositif permet aussi de relever la température maximale inter-couches ainsi que le temps de pause nécessaire à la redescente de la température inter-couches en dessous d'un seuil donné.

3 Méthode expérimentale d'évaluation de la température inter-couches

3.1 Stratégie de mesure

Afin de mesurer la température inter-couches, la stratégie utilisée se base sur la trajectoire de fabrication. Une fois le dépôt d'un cordon terminé, le spot du pyromètre est placé sur le point de démarrage de dépôt du cordon suivant (hormis pour le dernier cordon où la mesure n'est pas effectuée). Cependant, étant donné la taille du spot du pyromètre, il est possible que celui-ci pointe sur une zone dont l'émissivité est différente de celle du matériau considéré à cause d'oxydation ou de dépôt divers. Ainsi, la stratégie consiste à mesurer sur une certaine distance le long de la trajectoire de la couche suivante à partir du point de démarrage de dépôt, en effectuant un balayage périodique, Figure 2. La température maximale mesurée sur cette zone est alors enregistrée. Les paramètres de la trajectoire de mesure sont contenus dans le Tableau 2. Afin de procéder au balayage, la fonction *Weaving* proposée par FANUC est utilisée.

Si la température maximale relevée est supérieure au seuil de température inter-couches, le cycle de mesure est reconduit en parcourant le même trajet jusqu'à ce que la consigne soit respectée. Une fois le seuil de température inter-couches atteint, le dépôt reprend et la température maximale mesurée à chaque cycle de mesure ainsi que le temps de pause sont relevés.

Tableau 2 : Paramètres de la trajectoire de mesure de température.

Longueur de balayage	Amplitude du balayage	Fréquence du balayage	Vitesse d'avance
50 mm	4 mm	4 Hz	50 mm/s

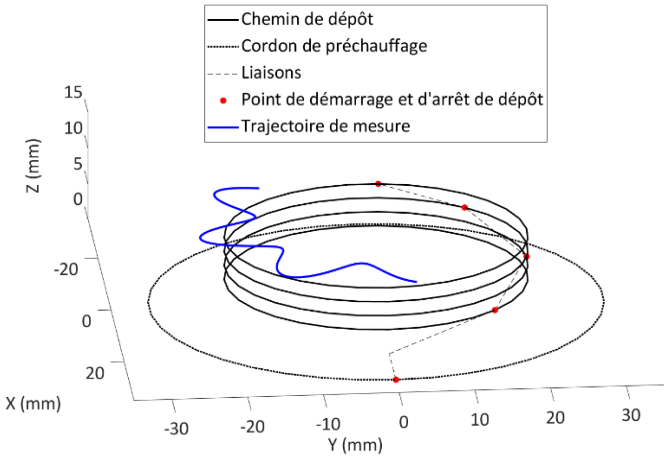


Figure 2 : Trajectoire de mesure de température inter-couches précédant la cinquième couche.

3.2 Evaluation du seuil de température inter-couches optimal

Afin de déterminer le seuil de température inter-couches optimal, quatre cylindres de diamètre nominal 40 mm à parois minces composés de 25 couches ont été fabriqués avec des seuils de température inter-couches différents. Afin que l'évacuation de la

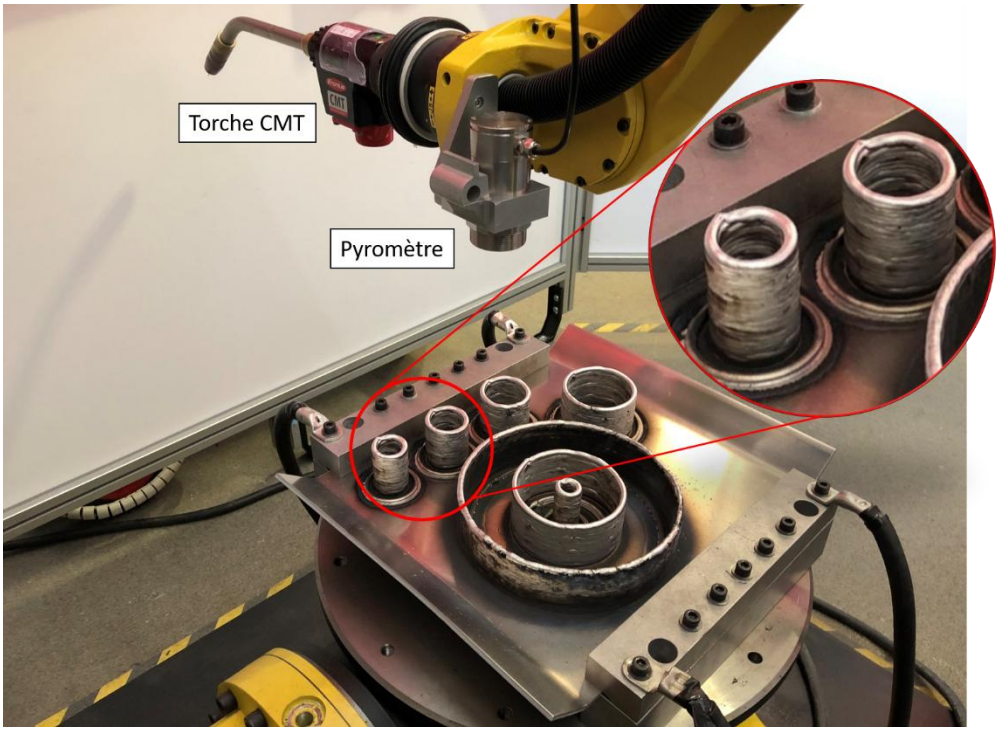
chaleur, dépendant entre autres des éléments de bridage, soit la plus homogène possible entre tous les essais, les cylindres ont été répartis symétriquement sur le substrat. Chaque cylindre est composé de 25 couches avec des phases de démarrage et d'arrêt de dépôt répartis angulairement (45°) de manière à minimiser l'empilement de défauts de forme locaux. Afin de préchauffer le substrat, un cordon de préchauffage (correspondant à la couche 0), concentrique avec le cylindre, est déposé (Figure 2 et Figure 3).

En fonction de l'étude bibliographique et des capacités de mesure du pyromètre équipant la cellule de fabrication additive ROBOWAM, les seuils de température considérés sont les suivants : 160 °C, 200 °C, 250 °C et 300 °C. Le diamètre extérieur et la hauteur des cylindres ont été déterminés à l'aide d'un bras de mesure Römer AbsoluteArm équipé d'un palpeur sphérique de diamètre 6 mm. Les résultats sont regroupés dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Mesures géométriques de cylindres pour différents seuils de température inter-couches

Seuil de température inter-couches (°C)	Diamètre extérieur (mm)	Hauteur (mm)
160	44.80	51.58
200	45.00	49.50
250	45.46	45.80
300	45.81	44.21

Conformément à ce qui est décrit dans la littérature, un seuil de température inter-couches plus important rend les températures inter-couches maximales plus importantes. Les temps de pause augmentent, en fonction du seuil utilisé, mais aussi en fonction de la position de la couche, étant donné l'évolution de la conduction thermique au fil des couches. En revanche, le défaut de cylindricité est peu impacté par le changement du seuil de température inter-couches, contrairement au diamètre extérieur du cylindre et à sa hauteur. En effet, plus le seuil de température inter-



couches est élevé, plus le cordon se tasse et s'étale. Durant ces essais de fabrication, seule la température inter-couches seuil de 160 °C a permis de déposer des cordons

Figure 3 : Résultat de fabrication des cylindres de différents diamètres.

dont la géométrie est en accord avec la trajectoire utilisée. Ce seuil correspondant aussi à ceux relevés dans la littérature, c'est donc celui-ci qui sera retenu pour les essais suivants.

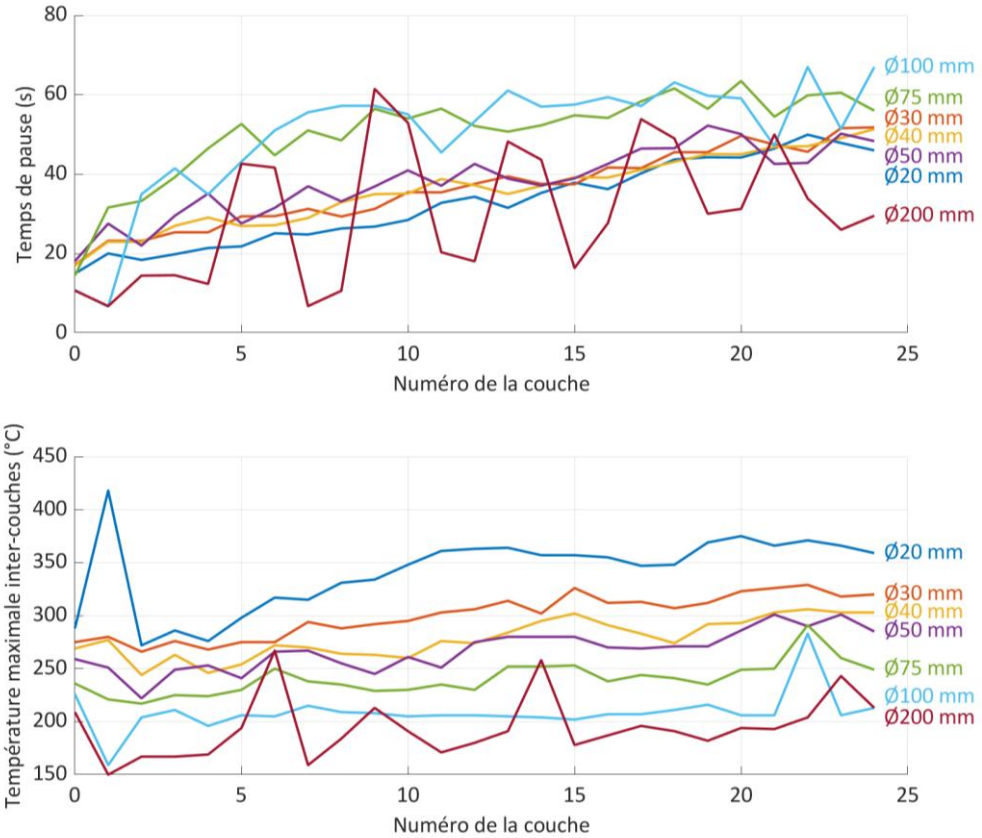
3.3 Résultats de fabrication pour des cylindres de différents diamètres

Afin de vérifier l'impact du diamètre nominal du cylindre sur le défaut géométrique de celui-ci, les diamètres nominaux qui ont été considérés sont les suivants : 20, 30, 40, 50, 75 ,100, 200 mm. Les trajectoires sont générées conformément à ce qui est décrit dans la Partie 3.2. Tous ces cylindres ont été fabriqués sur un même substrat. Le résultat de fabrication est visible à la Figure 3.

4 Analyse des essais expérimentaux

4.1 Influence du nombre de couches sur le comportement thermique

Pour chaque cylindre déposé, la température inter-couches maximale ainsi que le temps de pause nécessaire au respect du seuil de température inter-couches ont été relevés. L'évolution de ces paramètres est présentée à la Figure 4. Ainsi, la température inter-couches maximale atteinte est inversement proportionnelle au diamètre nominal du cylindre fabriqué et semble se stabiliser, tandis que les temps de pause inter-couches ont tendance à augmenter, sauf pour le cylindre de diamètre nominal 200 mm, sans se stabiliser. Ceci peut s'expliquer par la capacité d'évacuation de la chaleur relative à la quantité de matière présente dans la pièce. Ainsi, hormis pour le cylindre de diamètre nominal 200 mm, comme le temps de dépôt effectif pour une couche est proportionnel au diamètre, au plus celui-ci est important, au plus de



chaleur est transmise à la pièce et répartie dans la matière présente. De plus, comme la surface d'échange augmente avec le diamètre, la chaleur est évacuée plus

Figure 4 : Temps de pause et températures maximales inter-couches en fonction du diamètre nominal du cylindre. Cylindres de 25 couches.

efficacement pour les plus grands diamètres. En revanche, les conditions initiales de dépôt étant différentes pour chaque cylindre, les temps de pause inter-couches sont influencés par le nombre de cylindres déjà déposés.

Dans le cas du cylindre de diamètre nominal 200 mm, un régime semi-stable semble établi pour le temps de pause inter-couches. En effet, lorsque ce régime semi-stable est atteint, il y a un enchaînement de deux temps de pause « courts », puis de deux temps de pause « longs ». Une hypothèse est que ce régime est dû à l'inertie thermique du système composé du cylindre en cours de fabrication, du substrat, du système de bridage et du vireur 2-axes. Ainsi, lors du dépôt d'une couche, le système complet emmagasine de la chaleur puis la restitue selon les différents modes de transfert. Lorsque le système devient saturé, les temps de pause augmentent jusqu'à ce qu'il soit capable d'emmagasiner de nouveau la chaleur issue du dépôt. Ce phénomène apparu avec le cylindre de diamètre nominal 200 mm est probablement dû au temps de dépôt effectif d'une couche beaucoup plus élevé que pour les autres diamètres considérés.

4.2 Influence du diamètre nominal sur la géométrie

Pour chaque cylindre fabriqué, le défaut de cylindricité et le diamètre de la surface extérieure ainsi que leur hauteur ont été mesurés. Pour les cylindres le permettant, c'est-à-dire ceux présentant un diamètre supérieur à 30 mm (pour des raisons d'accès de l'outil de mesure) le défaut de cylindricité et le diamètre de la surface intérieure ont été mesurés. Le contrôle s'est fait à l'aide de l'équipement de mesure décrit à la Partie 3.2. Pour chaque mesure, 25 points répartis aléatoirement sur la surface intérieure et/ou extérieure ont été relevés et la mesure répétée cinq fois pour chaque cylindre. Les résultats sont illustrés aux Figure 5 et Figure 6.

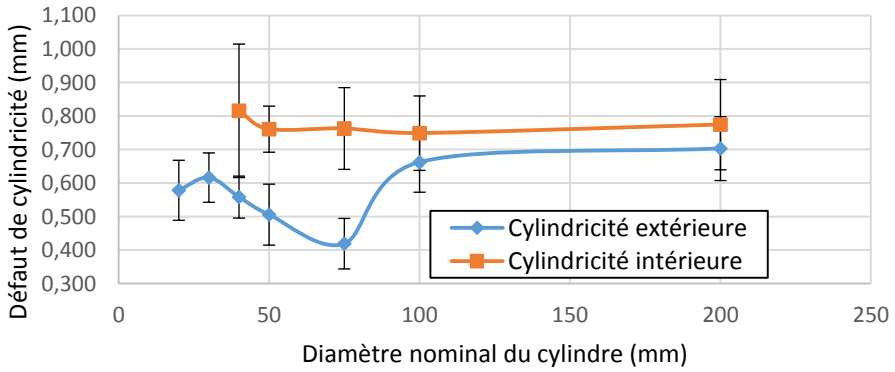


Figure 5 : Défauts de cylindricité en fonction du diamètre nominal du cylindre.

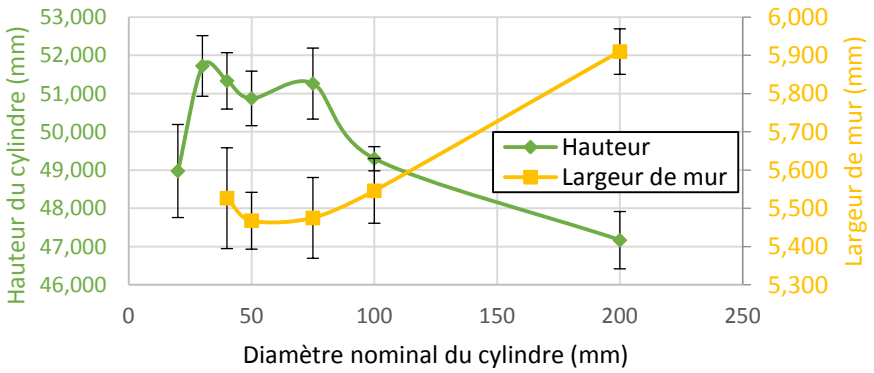


Figure 6 : Hauteur et épaisseur du cylindre en fonction de son diamètre nominal.

Pour tous les diamètres nominaux considérés, le défaut de cylindricité intérieur varie assez peu alors que la cylindricité extérieure est plus variable, avec cependant une variabilité plus conséquente dans le cas de la cylindricité intérieure.

Par ailleurs, la largeur de mur et la hauteur du cylindre varient en fonction du diamètre nominal de celui-ci. Cette variation est due à un changement de la morphologie du cordon qui a tendance à s'étaler, comportement similaire à celui décrit dans l'état de l'art. Ceci peut s'expliquer par l'accumulation de chaleur au sein de la pièce en cours de fabrication : plus le diamètre nominal du cylindre est important, plus le temps de dépôt par couche est important et donc la quantité de chaleur transmise augmente, impactant donc la morphologie du cordon déposé. Cette modification de la hauteur de couche réellement déposée crée de plus un décalage entre la trajectoire de fabrication et la forme de la pièce en cours de fabrication, ce qui a pour conséquence une modification des paramètres opératoires de dépôt (notamment du stick-out), pouvant de surcroît impacter la géométrie du cordon. Cette modification de morphologie peut aussi avoir un impact sur la qualité géométrique du cylindre fabriqué, étant donné que la forme du cordon déposé n'est plus maîtrisée. Afin de résoudre ce problème, une modification des seuils de température inter-couches en fonction du diamètre nominal du cylindre peut être envisagée. Il est aussi possible de ne plus procéder à la gestion de température inter-couches, mais plutôt de gérer la température d'une portion de couche d'une longueur donnée. Cette solution oblige cependant à procéder à plus d'arrêts et démarrages de dépôt, pouvant impacter localement la géométrie de la pièce en cours de fabrication et donc la géométrie de la pièce complète.

5 Conclusions

Afin d'améliorer la qualité géométrique de pièces obtenues par WAAM, une méthode de mesure de la température in-situ et de gestion de la température inter-couches a été mise en place et testée sur des pièces cylindriques à parois minces. Cette méthode, basée sur le balayage du cordon déposé par le dispositif de mesure permet de relever la température maximale inter-couches mesurée ainsi que le temps de pause nécessaire pour atteindre un certain seuil de température. Afin de valider cette méthode et de déterminer l'influence du diamètre de pièces de révolution à parois minces sur la gestion thermique de celles-ci, des cylindres de différents diamètres nominaux ont été fabriqués en respectant un seuil de température inter-couches de 160 °C. L'observation des courbes de température maximale inter-couches relevées lors de la mesure ainsi que des temps de pause nécessaires montrent que le diamètre nominal du cylindre a un impact fort sur ces deux paramètres. Ainsi, la température maximale inter-couches relevée lors de la mesure est inversement proportionnelle au diamètre nominal du cylindre tandis que les temps de pause inter-couches ont tendance à augmenter avec lui. De plus, les mesures géométriques de ces cylindres montrent que le défaut de cylindricité est peu impacté par le diamètre tandis que la largeur de mur a tendance à augmenter avec celui-ci, à l'inverse de la hauteur des cylindres qui diminue. La modification de la hauteur des couches déposées a ainsi un impact sur l'adéquation entre la trajectoire de fabrication et la géométrie de la pièce en cours de dépôt.

Pour pallier à ce problème, des systèmes de refroidissement actifs peuvent être mis en place, comme proposé par (Kozamernik et al., 2020), afin d'accélérer le refroidissement de la pièce entre le dépôt de deux couches consécutives. Il est aussi possible de procéder à une gestion de la température des cordons déposés non plus

couche par couche, mais fonction d'une longueur de cordon qu'il sera nécessaire de déterminer. Cette méthode risque cependant d'augmenter le nombre de départs et d'arrêts de dépôts, qui sont les phases les plus à même de créer des défauts métallurgiques ou des défauts de formes locaux non désirables. L'utilisation d'une caméra thermique, couplée au pyromètre, permettra aussi une observation globale de la température de la zone de travail ainsi que des flux de chaleur, dans le but de mieux maîtriser les temps de pause inter-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 le CARTT de l'IUT de Toulon pour le co-financement du pyromètre, l'IUT de Toulon pour la mise à disposition des locaux et son soutien financier.

Références bibliographiques

Bai, J.Y., Fan, C.L., Lin, S. b., Yang, C.L., Dong, B.L., 2016. Effects of thermal cycles on microstructure evolution of 2219-Al during GTA-additive manufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 87, 2615–2623. https://doi.org/10.1007/s00170-016-8633-1

Bayle, F., Doubenskaia, M., 2008. Selective laser melting process monitoring with high speed infra-red camera and pyrometer. The International Society for Optical Engineering. https://doi.org/DOI: 10.1117/12.786940

Cadiou, S., Courtois, M., Carin, M., Masson, P.L., Paillard, P., 2019. Développement d'un modèle 2D axisymétrique prédictif pour la fabrication additive arc-fil. Presented at the 24ème Congrès Français de Mécanique, Brest.

Chabot, A., Rauch, M., Hascoët, J.-Y., 2018. Towards coupled monitoring for metallic AM processes. Presented at the Conférence MUGV, Bordeaux.

Chergui, A., Villeneuve, F., Vignat, F., Béraud, N., 2019. Simulation thermique du procédé Wire Arc Additive Manufacturing. Presented at the Colloque national S-mart, Les Karellis (France).

Geng, H., Li, J., Xiong, J., Lin, X., 2017. Optimisation of interpass temperature and heat input for wire and arc additive manufacturing 5A06 aluminium alloy. Science and Technology of Welding and Joining 22, 472–483. https://doi.org/10.1080/13621718.2016.1259031

Köhler, M., Hensel, J., Dilger, K., 2020. Effects of thermal cycling on Wire And Arc Additive Manufacturing of al-5356 components. Metals 10, 952. https://doi.org/10.3390/met10070952

Kozamernik, N., Bračun, D., Klobčar, D., 2020. WAAM system with interpass temperature control and forced cooling for near-net-shape printing of small metal components. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 110, 1955–1968. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05958-8

Williams, S.W., Martina, F., Addison, A.C., Ding, J., Pardal, G., Colegrove, P., 2016. Wire + arc additive manufacturing. Materials Science and Technology 32, 641–647. https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073

Wu, B., Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Han, J., Fei, Z., 2017. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. Journal of Materials Processing Technology 250, 304–312. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.037

Xiong, J., Lei, Y., Li, R., 2017. 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 126, 43–52. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.168

Yu, J., Lin, X., Ma, L., Wang, J., Fu, X., Chen, J., Huang, W., 2011. Influence of laser deposition patterns on part distortion, interior quality and mechanical properties by laser solid forming (LSF). Materials Science and Engineering: A 528, 1094–1104. https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.09.078