



**HAL**  
open science

## Les éléments importants pour fabriquer des pièces massives par technologie WAAM

Thanh Hoang Vo, Christelle Grandvallet, Frédéric Vignat

### ► To cite this version:

Thanh Hoang Vo, Christelle Grandvallet, Frédéric Vignat. Les éléments importants pour fabriquer des pièces massives par technologie WAAM. 17ème colloque national S-mart AIP-PRIMECA, Université Polytechnique Hauts-de-France [UPHF], Mar 2021, Laval Virtual World, France. hal-03296283

**HAL Id: hal-03296283**

**<https://hal.science/hal-03296283>**

Submitted on 22 Jul 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.

# Les éléments importants pour fabriquer des pièces massives par technologie WAAM\*

\*Hoang Vo Thanh

Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP  
46, avenue Félix Viallet  
38000 Grenoble, France  
thanh-hoang.vo@grenoble-inp.fr

Christelle Grandvallet, Frédéric Vignat

Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP  
46, avenue Félix Viallet  
38000 Grenoble, France

**Résumé** — La technologie WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) est un procédé basé sur la fusion d'un fil métallique utilisant un arc électrique comme source de chaleur. Le WAAM a un impact significatif sur la réduction du coût et du temps de production des pièces métalliques massives complexes. Toutefois, la gestion de la température et du cordon de soudure reste un défi car les hautes températures peuvent causer des déformations dans la pièce. Des variables telles que vitesse de torche (TS), vitesse d'apport de fil (WFS), et temps de repos jouent un rôle important dans la géométrie de cordon qui donne la forme finale à la pièce; d'où la nécessité d'une méthode pour choisir une bonne combinaison des paramètres de fabrication. Cet article propose ainsi un modèle qui aide à construire des pièces massives par WAAM. L'étude s'intéresse aux étapes pour déterminer les paramètres process. Un plan d'expérience avec différents échantillons fabriqués par soudage CMT (Cold Metal Transfer) et avec une stratégie de remplissage en zigzag identifie l'influence de la longueur de cordon sur ces paramètres.

**Mots-clés**— Wire Arc Additive Manufacturing, Cold Metal Transfer, stratégie zigzag, paramètres WAAM

## I. INTRODUCTION

### A. La technologie WAAM et le procédé CMT

Le WAAM est un procédé de fabrication additive basée sur les dépôts de fil métallique en utilisant [1]:

- une source de chaleur : l'énergie d'un arc électrique
- un réservoir de matière : sous forme de fil
- un système de déplacement

Différentes technologies sont utilisées pour la fabrication WAAM, par exemple, la soudure à l'arc plasma (PAW) [2], le soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène (TIG), le soudage à l'arc en atmosphère (inerte ou active) avec fil fusible (MIG, MAG, GMAW) [3] et le Cold Metal Transfer (CMT) [4].

Le procédé CMT (Cold Metal Transfer) en particulier a été développé par la société FRONIUS [4]. Il s'agit d'un système GMAW amélioré. Ce procédé est qualifié de soudage à "froid", car il permet, par rapport au GMAW conventionnel, de réduire l'apport de chaleur. Cet aspect est intéressant pour la fabrication additive car l'objectif est d'associer des cordons pour construire un composant : l'énergie est donc utilisée pour faire fondre une partie du cordon précédemment déposé. Si

l'énergie apportée à la pièce est trop importante, il n'est pas possible de construire un composant car cela peut créer un écroulement de la matière. Le principe de ce procédé repose sur un mouvement d'avance et de recul du fil. Ainsi, le cordon est déposé sous forme d'une succession de gouttes. Les étapes du cycle CMT sont représentées sur la Figure 1.

Le procédé CMT [4] présente trois avantages principaux par rapport au soudage GMAW standard :

- la quasi-absence de projection lors de la soudure : le recul du fil forme une goutte pendant le court-circuit, la soudure est donc propre et le matériau homogène ;
- le faible apport de chaleur (court-circuit très court donc l'arc apporte de la chaleur de manière ponctuelle) ;
- la stabilité de l'arc (le paramétrage et le réglage de la longueur de l'arc interviennent de manière mécanique).

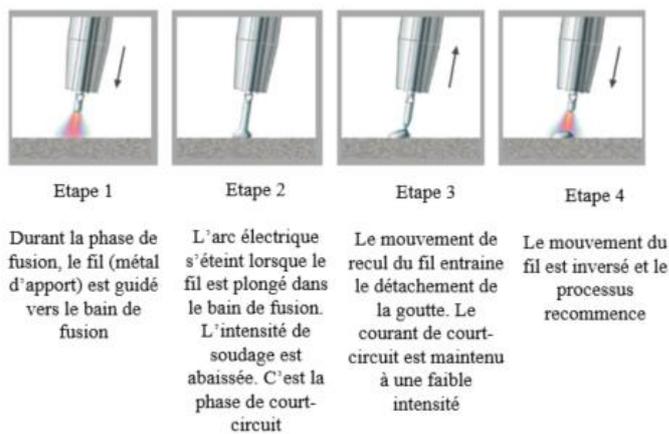


Figure 1. PRINCIPE DU CYCLE CMT

Fabriquer des grandes pièces par WAAM signifie réaliser des pièces massives, c'est-à-dire en multi-cordon sur la largeur, et non fabriquer des murs fins en mono-cordon. Celles-ci peuvent en outre être à géométrie complexe.

### B. Objectifs et scope

L'objectif de ce travail de recherche est de proposer une méthode de fabrication de pièces massives par WAAM avec le procédé CMT. Aussi, cette étude se concentre sur la stratégie et les paramètres de fabrication avec des trajectoires 5 axes.

Cet article présentera tout d’abord l’état de l’art sur les éléments importants pour fabriquer des pièces massives par WAAM, à savoir les différentes stratégies et les paramètres de fabrication. Dans une section suivante sont présentés les paramètres influents sur la fabrication de pièces massives. Différentes expérimentations sont décrites ensuite afin de trouver quels paramètres sont à ajuster. En conclusion, nous présentons nos résultats majeurs quant aux paramètres de fabrication et à la stratégie de remplissage.

## II. ETAT DE L’ART

Peu d’études sont disponibles sur la méthodologie de réalisation de pièces complexes par WAAM. Parmi elles, Vincent Quérard [6] a proposé en 2019 une démarche pour réaliser des pièces de grandes dimensions (Fig. 2).

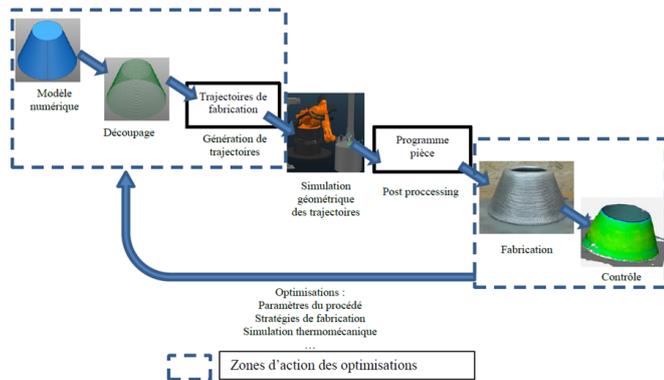


Figure 2. ARBRE DE CHOIX DU TYPE DE TRAJECTOIRES A GENERER EN CMT PAR QUERARD [6]

### A. Stratégie de fabrication

La génération de trajectoires s’appuie sur le modèle CAO de la pièce. Une étape de découpage permet d’obtenir les courbes qui décrivent les trajectoires de fabrication. Le découpage est généralement réalisé par une succession de plans parallèles [5] (Voir Figure 3).

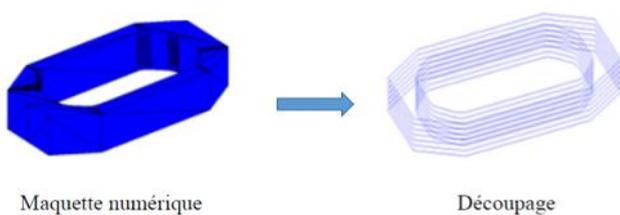


Figure 3. STRATEGIE DE DECOUPAGE EN PARALLELE

Afin de choisir le type des trajectoires à générer, il est nécessaire d’analyser localement la géométrie du composant à fabriquer [6]. Sur un même composant, nous pouvons distinguer différentes zones. Ces dernières peuvent être divisées en deux catégories :

- Les zones pouvant être réalisées directement avec des murs mono-cordon (sans remplissage), c’est-à-dire dont l’épaisseur de paroi est inférieure à la largeur d’un cordon.

- Les zones nécessitant un remplissage, correspondant à une pièce massive ou dont l’épaisseur de paroi est supérieure à la largeur d’un cordon.

La démarche de choix est résumée dans la Figure 4 afin de déterminer quel type de trajectoires générer pour la fabrication additive par WAAM. En effet, cette démarche préalable est nécessaire, car selon le résultat de ces choix, le découpage peut être affecté (par exemple, l’épaisseur de couche peut être différente entre un composant mono-cordon et un composant en remplissage). Trois types de trajectoires sont ainsi considérés : 3 axes, 5 axes et remplissage.

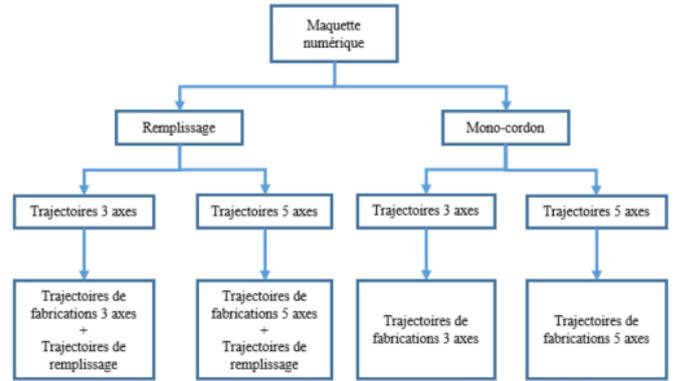


Figure 4. ARBRE DE CHOIX DU TYPE DE TRAJECTOIRES A GENERER AVEC LE CMT

La fabrication de pièces massives nécessite la génération de trajectoires de remplissage : dépôts de cordons côte à côte au sein d’une même couche. Plusieurs stratégies de remplissage peuvent être envisagées pour fabriquer des composants massifs: balayage raster [7], zigzag [8, 9], contour [10, 11], spiral [12, 13] (Figure 5).

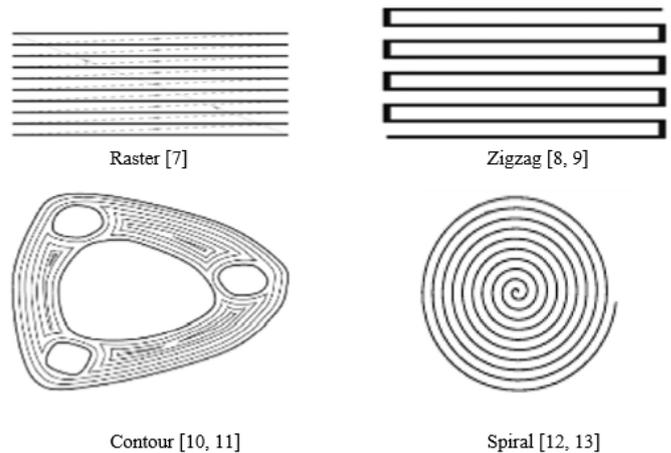


Figure 5. DIFFERENTES STRATEGIES DE REMPLISSAGE

La stratégie raster est basée sur la projection dans une seule direction [7]. Dérivée de la stratégie raster, la génération de trajectoire en zigzag est la méthode la plus utilisée dans les procédés de fabrication additive. Alors qu’elle remplit les géométries ligne par ligne le long d’une direction comme l’approche raster, l’approche en zigzag combine les lignes parallèles séparées en une seule passe continue, ce qui réduit

considérablement le nombre de passes de trajectoire d'outil [8, 9]. Cependant, la précision du contour de la pièce pour les approches raster et zigzag est médiocre en raison des erreurs de discrétisation sur toute arête qui n'est pas parallèle à la direction du mouvement de l'outil. La stratégie de contour, qui est une autre méthode typique, peut résoudre efficacement ce problème de qualité géométrique en suivant la tendance géométrique des contours de la pièce [10, 11]. Cependant, en décalant les contours, le schéma génère de nombreuses courbes fermées. Enfin, la génération de trajectoires en spirale est largement appliquée dans l'usinage à commande numérique (CN), mais ne convient que pour certains modèles géométriques spéciaux dans le processus AM [12, 13].

Le paramétrage de WAAM est par conséquent une tâche difficile, car plusieurs paramètres sont impliqués et sont interdépendants, ce qui rend le processus global complexe. Peu d'études proposent actuellement une méthode générale pour choisir les paramètres de fabrication. Un modèle de choix des paramètres de fabrication intéressant a été proposé par Quérard [6] en 2019 (Fig. 6). Deux étapes principales sont incluses :

- Etape 1: fabrication de cordons simples selon différents jeux de paramètres de fabrication (WFS et TS). Cette étape permet d'obtenir un domaine de stabilité des paramètres de fabrication. Un ensemble de paramètre (WFS, TS) peut alors être choisi parmi des valeurs dans ce domaine.
- Etape 2 : Des murs simples sont fabriqués avec des paramètres choisis pour obtenir une valeur de l'incrémenté en z en fonction des paramètres (WFS, TS).

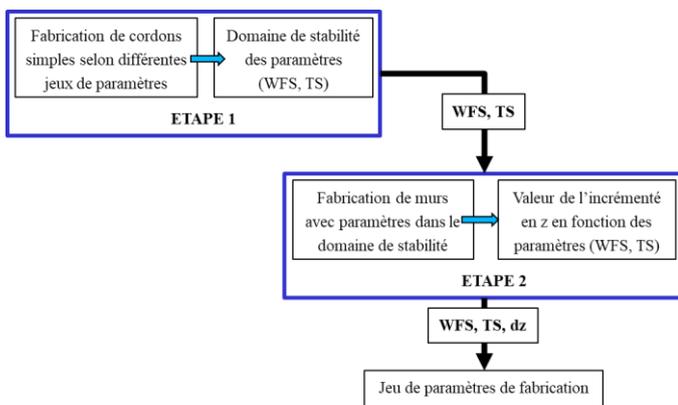


Figure 6. MODELE DE CHOIX DES PARAMETRES DE FABRICATION PROPOSE PAR QUERARD [6]

Les autres études disponibles sont concentrées sur l'influence des paramètres de fabrication sur la qualité du cordon soudure (géométrie et santé matière).

Dinovitzer et al. [14] ont appliqué la méthode de Taguchi et l'ANOVA pour déterminer les effets de la vitesse de déplacement, du taux d'alimentation du fil, du courant et du débit d'argon sur les réponses, y compris la forme et la taille des cordons, la rugosité des cordons, les niveaux d'oxydation, la fusion en profondeur et la microstructure. La vitesse de déplacement et le courant ont l'effet le plus important sur les réponses. L'augmentation de la vitesse de déplacement ou la

diminution du courant ont provoqué une diminution de la fusion à travers la profondeur et une augmentation de la rugosité.

Dahat et al. ont développé une méthode qui nous permet de faire le choix du courant (Im) et de la vitesse de déplacement (TS) pour une largeur de couche (LW) souhaitée. Ces paramètres ont conduit à éliminer moins de matériau en post-opérations [15].

## B. Conclusion

Les travaux existants nous montrent la capacité du procédé CMT à fabriquer des pièces complexes de grande dimension. Toutefois, ce type de procédé n'est pas facile à maîtriser, les paramètres étant différents pour chaque système de déplacement (robot de soudure) et chaque matériau. En effet, selon le matériau et le diamètre du fil, les modes de soudage doivent adapter l'apport d'énergie en fonction du besoin.

Certaines études parlent aussi de fabriquer des pièces en mono-cordon. Ces résultats nous permettent alors de choisir des paramètres de fabrication, des stratégies de fabrication pour les pièces fines. Malgré cela, nous ne savons pas si ces choix sont applicables à la fabrication de pièces massives.

Dans notre contexte, notre question de recherche se pose alors:

- *Quelles sont les principales difficultés pour fabriquer une pièce massive ?*

En particulier :

- *Comment fabriquer des pièces inclinées ?*
- *Comment fabriquer des singularités géométriques ?*

Pour y répondre, le principal défi est de maîtriser la forme du cordon (largeur et hauteur), ainsi que la température et le recouvrement des cordons. Diverses expérimentations doivent permettre de montrer quels paramètres sont à ajuster pour obtenir une pièce de qualité. Elles sont effectuées avec des murs simples en aluminium, des murs inclinés, puis des singularités géométriques. Celles-ci sont détaillées dans la section suivante.

## III. EXPERIMENTATIONS

Afin de lancer nos expérimentations, il est décidé de prendre le modèle d'une pale. En fabriquant un profil similaire à une section de pale, nous voulons en effet observer deux points : la stratégie de la fabrication et le choix des paramètres de fabrication.

### A. Stratégie de fabrication

Une des difficultés du WAAM est la fabrication de géométries inclinées. Des expérimentations ont été effectuées sur les géométries déportées simples comme un mur incliné, puis sur des géométries plus complexes. Une expérience de fabrication d'un mur incliné de 60° par rapport à l'axe horizontal avec deux stratégies différentes, la torche colinéaire avec le mur et la torche verticale, a montré deux résultats différents (Figure 7).



Figure 7. FABRICATION DE DEUX MURS INCLINES AVEC DEUX STRATEGIES DIFFERENTES

Une hypothèse a été proposée pour expliquer ces deux résultats avec ces deux stratégies de fabrication (Figure 8). En théorie, on souhaite fabriquer un mur incliné avec la direction  $d$ . L'incrémenté en  $z$  est  $h$ , et le point de soudure de chaque couche est  $P$ . En réalité, l'incrémenté en  $z$  est  $hr$ , donc le point de soudure de chaque couche est déplacé à  $P_r$ . Avec la torche verticale, le point de la soudure est déplacé selon la direction verticale. L'ensemble de  $P_r$  est sur la direction  $dr$ , par conséquent le mur réel a un écart avec le mur théorique. Pour la torche colinéaire, le point de la soudure  $P_r$  est déplacé selon la direction  $d$ , donc la direction du mur réel  $dr$  est la même que celle du mur théorique. La hauteur du mur a juste changé.

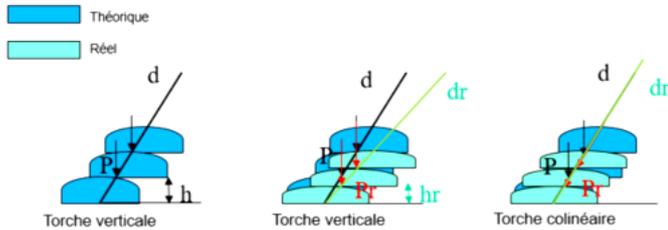


Figure 8. EXPLICATION SUR LES DEUX STRATEGIES DE FABRICATION UTILISEES

Le valeur de l'incrémenté en  $z$  est très importante pour obtenir une bonne géométrie. Afin de valider notre hypothèse, un mur incliné est fabriqué avec la torche verticale et avec une bonne valeur de l'incrémenté en  $z$  (Figure 9). Nous avons retrouvé un mur de  $59^\circ$ .

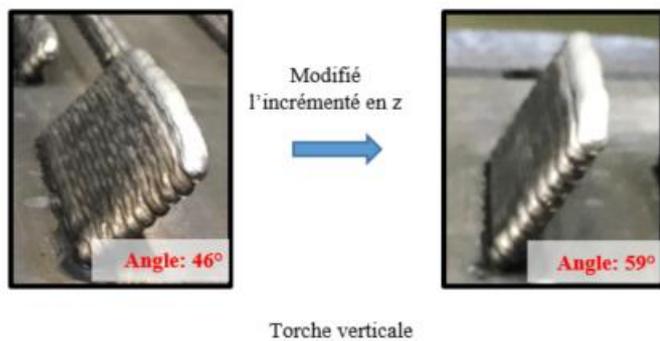


Figure 9. MUR OBTENU AVEC UNE BONNE VALEUR D'INCREMENTE EN Z

Dans une seconde expérience, la stratégie de fabrication a été testée sur une pièce massive. La Figure 10 présente une singularité géométrie. On peut distinguer deux zones dans ce profil:

- la zone 1 dont la largeur est inférieure à la largeur d'un seul cordon
- la zone 2 dont la largeur est supérieure à la largeur d'un seul cordon.

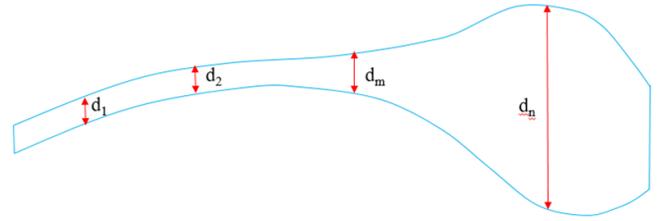


Figure 10. EXEMPLE DE SINGULARITE GEOMETRIQUE A FABRIQUER

Deux stratégies de fabrication ont été définies:

- Distinction des deux zones du profil

La zone 1 a été fabriquée en mono-cordon et la zone 2 en utilisant le remplissage en Zigzag (Figure 11).

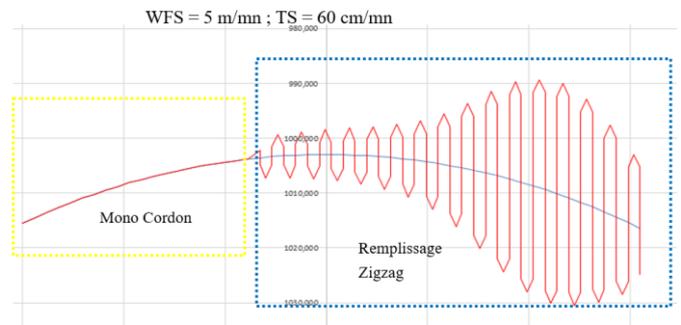


Figure 11. STRATEGIE MONO-CORDON ET REMPLISSAGE EN ZIGZAG

- L'utilisation du remplissage Zigzag pour toute la longueur du profil (Figure 12)

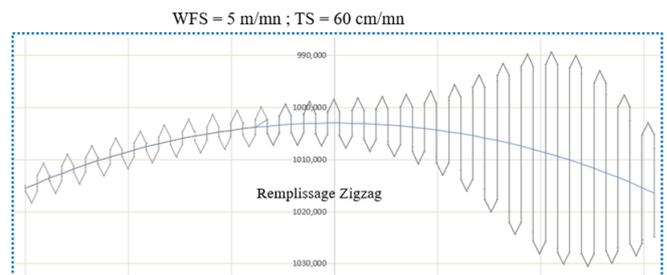


Figure 12. STRATEGIE DE REMPLISSAGE EN ZIGZAG

Pour les deux stratégies, seulement deux couches en aller – retour ont été construites volontairement afin de bien observer les différences entre ces deux pièces à cette hauteur (Figure 13).

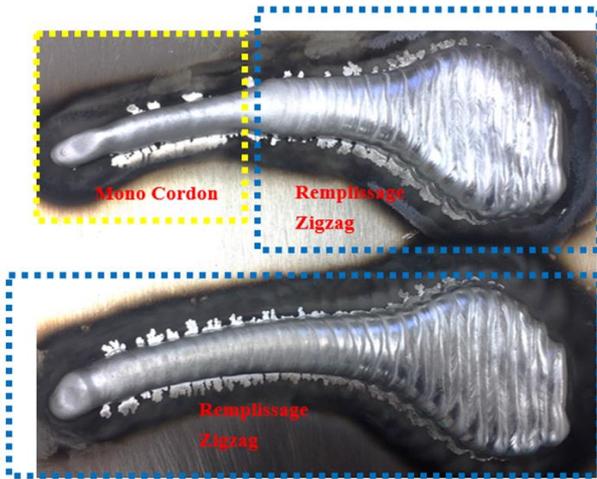


Figure 13. RESULTATS DE DEUX STRATEGIES AVEC DEUX COUCHES DE FABRICATION

Concernant la pièce fabriquée avec la stratégie 1, on observe un écart de plus de 2 mm entre la zone mono-cordon et la zone remplissage. En outre, il y a aussi un gros écart de la largeur à la position de changement entre deux zones.

Concernant la pièce fabriquée avec la stratégie 2, à la deuxième couche, la hauteur est assez similaire sur toute la pièce. Du point de vue de la qualité de surface et qualité géométrique, la deuxième stratégie est plus pertinente que la première. Aussi, afin d'observer la hauteur moyenne de chaque couche, la même pièce que l'expérience précédente a été fabriquée avec un nombre de couches supérieur à deux.

#### B. Influence des paramètres de fabrication sur la hauteur moyenne de la pièce

Un prototype avec dix couches fabriquées a été obtenu comme indiqué dans la Figure 14.

WFS = 5 m/mn ; TS = 60 cm/mn

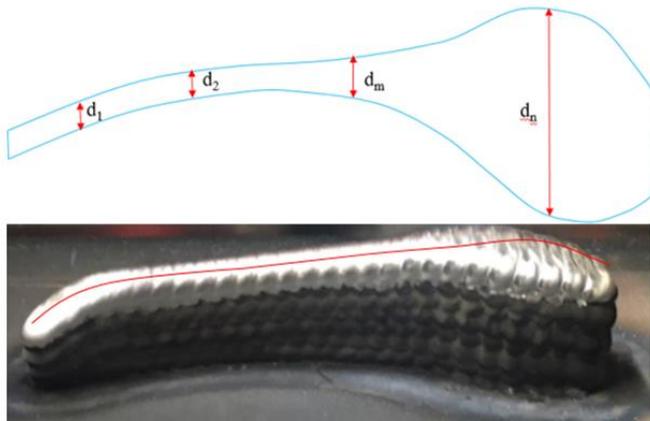


Figure 14. PROTOTYPE AVEC DIX COUCHES DE FABRICATION

La différence de hauteur de la pièce est remarquable. Celle-ci est plus basse aux deux côtés de la pièce parce qu'il y a un effet de bords. La hauteur de la pièce est différente selon la variation de la longueur du cordon  $d_n$ . La zone où le cordon est le plus long possède la plus grande épaisseur.

Ce problème peut s'expliquer comme suit : quand la longueur  $d$  du zigzag est plus grande, le temps de fabrication aller-retour est plus long. Le temps de refroidissement requis est par conséquent plus important, la température d'étalement est plus froide, ce qui entraîne la fabrication de cordons plus étroits et plus hauts.

Un autre prototype de dix couches a été fabriqué en modifiant la vitesse de déplacement (TS) par rapport la longueur du cordon afin d'obtenir une hauteur identique (4,5 mm) partout dans la pièce (Fig. 16). Pour chaque longueur du cordon, des murs massifs ont été fabriqué avec deux valeurs vitesse de déplacement différents. La hauteur moyenne de chaque prototype a été mesurée. On a considéré que la relation entre vitesses de déplacement et hauteur moyenne est une équation superlative (Fig. 15). Cette équation nous permet de calculer la vitesse de déplacement afin d'avoir une hauteur moyenne de 4,5 mm.

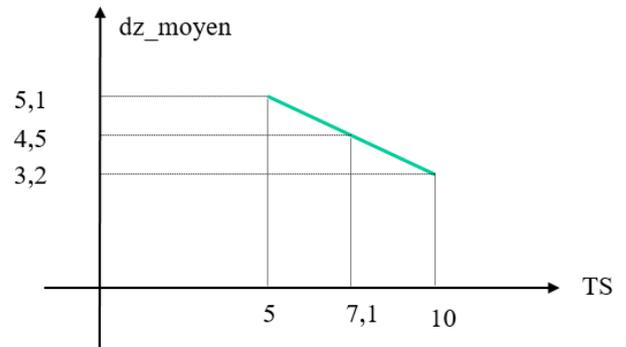


Figure 15. HAUTEUR MOYENNE EN FONCTION DE LA VITESSE DE DEPLACEMENT AVEC LONGUEUR DU CORDON DE 10MM

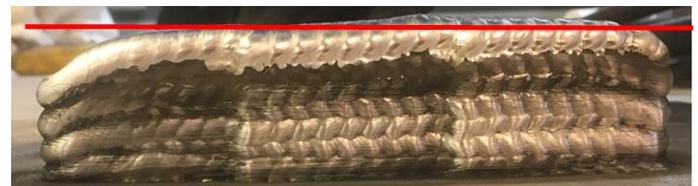
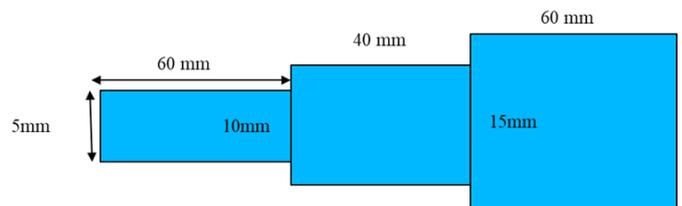


Figure 16. PROTOTYPE EN MODIFIANT LA VITESSE DE DEPLACEMENT (TS)

En général, la hauteur de la pièce est assez stable. Une hauteur moyenne de 4,6 mm a été obtenue contrairement aux 4,5 mm théoriques. Reste alors toujours le problème au bord de la pièce et dans la zone de changement de longueur du cordon.

#### C. Conclusion

Concernant la stratégie de fabrication, nous préconisons d'utiliser la stratégie de remplissage en zigzag partout dans la pièce, indépendamment de la largeur de la pièce.

Quant aux paramètres de fabrication, le modèle existant de choix des paramètres est correct pour une pièce en mono-cordon mais n'est pas adapté pour une pièce massive du fait du problème de la hauteur de la pièce.

Par conséquent, un nouveau modèle de choix des paramètres doit être développé.

#### IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le défi d'une pièce épaisse fabriquée en WAAM est qu'elle doit avoir une hauteur constante quelle que soit sa longueur et sa largeur, pour pouvoir la considérer comme de bonne qualité.

Pour fabriquer une pièce massive avec une singularité géométrique, nous avons cherché à identifier la stratégie de remplissage la meilleure et à identifier les paramètres de fabrication qui influent sur la qualité de la pièce :

- Une stratégie de remplissage en zigzag apporte de bons résultats.
  - Une valeur de l'incrémenté en z correctement déterminée donne une bonne géométrie de pièce (i.e. même géométrie que la modèle CAO).
  - Pour obtenir un bon prototype, la vitesse de déplacement (TS) doit varier selon la longueur du cordon.
- Cette étude a montré les points importants pour fabriquer les pièces massives (multi-cordon) par le WAAM. Bien que ses résultats ne permettent pas encore de déterminer les paramètres de fabrication, les perspectives qui en résultent pourraient concerner :
- Une proposition d'amélioration de la méthode de Quérard [6] pour la fabrication de pièces massives par WAAM.
  - Un modèle permettant de calculer la vitesse de déplacement (TS) en fonction de la longueur du cordon.

#### V. REFERENCES

- [1] W. S. Filomeno Martina, Wire + arc additive vs . from solid: a cost comparison, *Welding Engineering and Laser Processing Centre, Cranfield University*, 2015.
- [2] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, Wire-feed additive manufacturing of metal components : technologies, developments and future interests, *Int J Adv ManufTechnol*, 2014.
- [3] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM), *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 31, pp. 101–110, 2015.
- [4] Fronius, Cold Metal Transfer : The technology, *CMT technology*, 2014.
- [5] J. S. Panchagnula and S. Simhambhatla, Inclined slicing and weld-deposition for additive manufacturing of metallic objects with large overhangs using higher order kinematics, *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 11, no. 2, pp. 99–108, 2016.
- [6] Querard, Vincent. Réalisation de pièces aéronautiques de grandes dimensions par fabrication additive WAAM. Diss. 2019.
- [7] Dunlavey, M.R., Efficient polygon-filling algorithms for raster displays. *ACM Transactions on Graphics (Tog)*, 2(4), pp.264-273, 1983.
- [8] Park, S.C. and Choi, B.K., Tool-path planning for direction-parallel area milling. *Computer-Aided Design*, 32(1), pp.17-25, 2000.
- [9] Rajan, V.T., Srinivasan, V. and Tarabanis, K.A., The optimal zigzag direction for filling a two-dimensional region. *Rapid Prototyping Journal*, 2001.
- [10] Farouki, R.T., Koenig, T., Tarabanis, K.A., Korein, J.U. and Batchelder, J.S., Path planning with offset curves for layered fabrication processes. *Journal of Manufacturing Systems*, 14(5), pp.355-368, 1995.
- [11] Yang, Y., Loh, H.T., Fuh, J.Y.H. and Wang, Y.G., Equidistant path generation for improving scanning efficiency in layered manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 2002.
- [12] Li, H., Dong, Z. and Vickers, G.W., Optimal toolpath pattern identification for single island, sculptured part rough machining using fuzzy pattern analysis. *Computer-Aided Design*, 26(11), pp.787-795, 1994.
- [13] Wang, H., Jang, P. and Stori, J.A., A metric-based approach to two-dimensional (2D) tool-path optimization for high-speed machining. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 127(1), pp.33-48, 2005.
- [14] 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. *Additive Manufacturing*, 26, pp.138-146, 2019.
- [15] Dahat, S., Hurtig, K., Andersson, J. and Scotti, A., A methodology to parameterize wire+ arc additive manufacturing: a case study for wall quality analysis. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(1), p.14, 2020.