



**HAL**  
open science

# Influence des paramètres de fabrication et de l'orientation de la tête de dépôt sur les cordons produits par procédé laser-fil

Clément Roch, Sylvain Lavernhe, Christophe Tournier

## ► To cite this version:

Clément Roch, Sylvain Lavernhe, Christophe Tournier. Influence des paramètres de fabrication et de l'orientation de la tête de dépôt sur les cordons produits par procédé laser-fil. Conference Manufacturing21, Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay [ENS Paris Saclay], Oct 2022, Gif Sur Yvette, France. hal-04011650

**HAL Id: hal-04011650**

**<https://hal.science/hal-04011650>**

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.



# Influence des paramètres de fabrication et de l'orientation de la tête de dépôt sur les cordons produits par procédé laser-fil

Clément ROCH<sup>(a)</sup>, Sylvain LAVERNHE<sup>(a)</sup>, Christophe TOURNIER<sup>(a)</sup>

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

*Mail : [clement.roch@ens-paris-saclay.fr](mailto:clement.roch@ens-paris-saclay.fr)*

**Résumé :** Parmi les procédés de fabrication additive métallique par dépôt d'énergie concentrée, le procédé laser-fil, ou WLAM pour Wire Laser Additive Manufacturing, se distingue par l'utilisation d'un faisceau laser pour faire fondre un fil métallique d'apport et réaliser des cordons. Les dépôts successifs de cordons juxtaposés et superposés permettent de générer des volumes et d'obtenir des pièces. Ainsi, la maîtrise des géométries des cordons est essentielle pour établir le processus de fabrication additive. Plusieurs études se sont intéressées à ces géométries et à l'influence des principaux paramètres de fabrication sur leurs dimensions, mais peu s'intéressent à l'effet de la direction d'apport ou à l'inclinaison du fil. De plus toutes ces études ont été réalisées avec un apport du fil latéral différent de l'orientation du laser. Cet article s'intéresse à l'influence de l'orientation de la tête de dépôt pour un apport de fil coaxial avec 3 faisceaux laser sur les géométries de cordons. Une campagne expérimentale est menée avec différentes orientations par rapport à un substrat horizontal et les profils externes sont mesurés par moyen optique afin d'extraire les profils moyens et les dimensions caractéristiques. Une influence de la rotation propre et de l'inclinaison latérale sur la hauteur, la largeur et l'asymétrie des cordons est mise en évidence.

**Mots clés :** Fabrication additive, WLAM, laser fil, faisabilité, paramétrie, inclinaison

## 1 Introduction

La fabrication additive métallique représente un enjeu majeur pour le développement de nouvelles stratégies de production. Plusieurs procédés sont déjà mis en œuvre, qu'ils exploitent une matière d'apport sous forme de poudre ou de fil métallique. L'emploi de fil permet de simplifier les installations nécessaires en réduisant les contraintes liées à la manipulation des poudres, et de produire des pièces pleines avec des volumes importants, comme observé en fabrication additive arc-fil, ou *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM). Une autre technologie utilisant un fil métallique, mais exploitant cette fois un apport d'énergie par faisceau laser est la fabrication additive laser-fil, ou *Wire Laser Additive Manufacturing* (WLAM). Sous cette dénomination se retrouvent plusieurs configurations en fonction de différents choix technologiques ou d'éléments additionnels. On retrouve par exemple le fil chaud, ou hot-wire, qui permet de limiter la puissance laser nécessaire pour la fabrication (Nie, 2016). Des différences sont également possibles concernant l'apport de matière et de puissance. En effet le fil peut être apporté suivant un axe différent ou identique à celui du faisceau laser, donnant alors une configuration coaxiale. La technologie coaxiale peut résulter de l'utilisation de plusieurs faisceaux laser (Du, 2019) ou d'un faisceau annulaire (Ayed, 2020).

Par la grande variété de dispositifs expérimentaux et de cas d'usages possibles, chaque installation nécessite l'établissement de recettes de fabrication, souvent de façon empirique par plans d'expériences. La démarche habituelle consiste en la réalisation de cordons simples pour établir les paramètres initiaux de fabrication, puis en l'étude de cordons juxtaposés pour obtenir des surfaces, et enfin en l'étude des couches, pour des murs mono-cordons ou des pièces massives. Ainsi nous nous intéressons dans un premier temps à l'influence des paramètres du procédé sur les cordons simples. Pour les procédés fil les études se portent principalement sur les géométries de cordons, avec l'analyse des profils externes, aussi appelés de renforcement, et internes, appelés de pénétration. La figure 1 présente ces profils sur un exemple avec les grandeurs caractéristiques utilisées pour décrire les cordons : la largeur  $W$ , la hauteur  $H$ , l'angle de mouillage  $\theta$  et la pénétration  $P$ . Deux autres paramètres utilisés, non représentés sur la figure, sont la surface en coupe  $A$  qui est considéré comme l'aire supplémentaire par rapport à la surface initiale, et le taux de dilution, défini par le ratio de l'aire du cordon pénétrant le substrat sur l'aire totale.

Plusieurs modèles ont été proposés dans la littérature pour décrire les profils de renforcement, avec des modèles elliptiques (Aiyiti, 2006) (Sharma, 2015), sinusoïdaux (Cao, 2011) ou polynomiaux de degré 2 (Kim, 2000) (Suryakumar, 2011) ou 4 (Kumar, 2021). Une étude comparative par Ding et al. (Ding, 2015) met en évidence que tous ces modèles présentent une représentation satisfaisante des cordons, tandis que Xiong et al. (Xiong, 2013) établit que le modèle optimal est lié au ratio entre vitesse fil et vitesse tête. La plupart des études se concentrent sur les liens entre les dimensions des cordons et trois paramètres principaux de pilotage du procédé : la puissance du laser, la vitesse d'apport du fil et la vitesse de déplacement de la tête. Ces travaux montrent notamment que les largeurs et hauteurs des cordons peuvent varier indépendamment. Medrano-Tellez puis Abioye et al. (Abioye, 2013) montrent que le lien entre la puissance et la vitesse du fil est essentiel pour garantir la stabilité, avec l'apparition de deux défauts principaux : le dripping lorsque la puissance est trop élevée par rapport à la vitesse fil et le stubbing lorsqu'elle est trop faible (Medrano-Tellez, 2010).

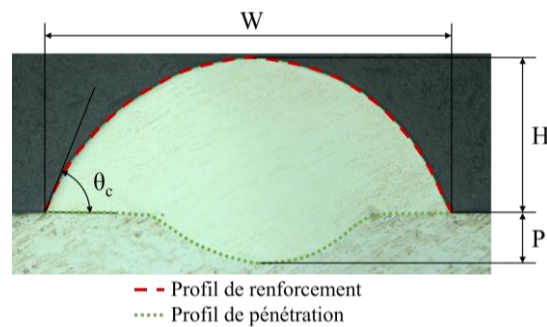


Figure 1: vue en coupe d'un cordon avec les principales dimensions

Une étude s'intéresse en détail à la direction d'apport du fil et montre que la direction d'apport influe principalement sur l'aspect des cordons, en obtenant des cordons plus lisses pour un apport par l'avant (Mok, 2008). Pour les têtes où le faisceau laser et le fil ont des axes distincts, l'angle d'apport du fil par rapport au substrat influe également sur les géométries obtenues. Cependant la tête de dépôt dont nous disposons utilise trois faisceaux laser répartis autour du fil pour obtenir une configuration coaxiale. Nous n'avons pas relevé d'articles dans la bibliographie portant sur l'influence de l'orientation et de l'inclinaison des têtes coaxiales sur la géométrie des cordons. La majorité des articles pour des technologies coaxiales s'intéressent exclusivement à la vitesse fil, vitesse tête et puissance laser, avec parfois un regard sur la distance entre le point d'intersection des faisceaux et la pièce (Oliari, 2017).

Cependant, en cours de fabrication l'orientation de la tête par rapport à la pièce est amenée à varier lors de changements de direction de fabrication si son orientation n'est pas fixée par rapport à la normale locale et à la direction d'avance. De plus, des variations d'inclinaison de la tête par rapport au substrat peuvent être exploitées pour accéder sans collision à certaines zones de la pièce, ou pour gérer la gravité. Nous cherchons donc à identifier si l'inclinaison de la tête ou son orientation par rapport au substrat ont un effet sur les géométries externes des cordons produits avec une tête coaxiale à 3 faisceaux.

Cet article présente une analyse des géométries de cordons fabriqués pour différentes inclinaisons et orientations de la tête, en commençant par présenter le dispositif expérimental, puis en expliquant la démarche choisie avant de présenter les résultats obtenus. Ces résultats sont ensuite discutés avant de conclure sur les effets d'orientation.

## 2 Configuration expérimentale et recettes de fabrication

Les travaux ont été effectués sur la cellule hybride fabrication additive - soustractive de l'IRS Fabrication Additive Paris Saclay (FAPS) opérée au Lurpa (figure 2). La fabrication repose sur la technologie laser-fil, mise en œuvre par une tête Coaxworks portée par un robot IRB4600 d'ABB et une source de puissance laser à fibre Ytterbium d'une puissance maximale de 4 kW (IPG YLS4000). Le matériau d'apport est un fil d'IN718 de diamètre 1,2 mm, apporté par un dévidoir DINSE (FDE-PN 100L). Les pièces sont réalisées sur des substrats d'acier S235 JR de 80mm de long pour 40 mm de large et 10 mm d'épaisseur. Une caméra de suivi de soudage Xiris est fixée à la tête, permettant ainsi d'observer le comportement du procédé en temps réel. Par ailleurs, les optiques de la tête sont protégées par un flux d'air comprimé venant chasser fumées et projections, et le bain de fusion est protégé des oxydations par un flux d'Argon avec une pression de 2 bars.

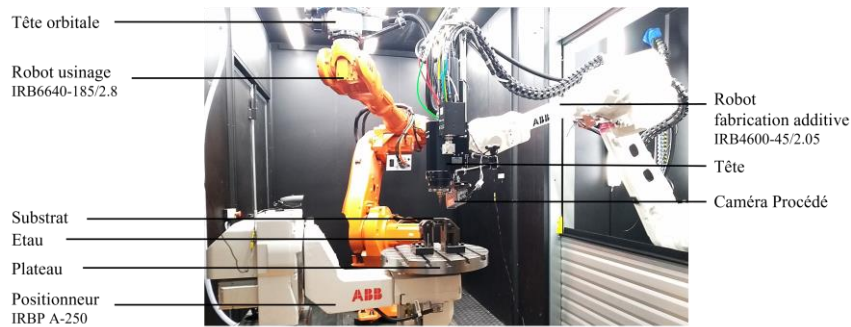


Figure 2 : présentation de la cellule hybride fabrication additive-soustractive

La tête étudiée divise le faisceau initial en 3 faisceaux laser équirépartis autour de l'axe vertical de la tête (axe z) respectivement à  $-90$ ,  $150$  et  $30^\circ$  par rapport à l'axe x pour les faisceaux 1, 2 et 3, et forment un angle de  $17,5^\circ$  par rapport à z. Dans la configuration standard de production la tête est orientée pour que son axe z soit suivant la gravité.

Les premiers essais sur le procédé ont permis d'établir une plage de faisabilité, en retrouvant les défauts de stubbing lorsque la puissance est trop faible par rapport à la vitesse fil, et de dripping lorsqu'elle est trop importante. En plus de ces défauts, deux phénomènes supplémentaires ont pu être observés. À faible puissance laser et faible vitesse fil, il est possible de voir apparaître un phénomène de manque de fusion (figure 3a), où l'énergie est suffisante pour faire fondre le fil, mais pas le substrat, résultant en un cordon sans accroche. Ce phénomène avait déjà pu être observé par Medrano-Tellez, qui le caractérise par une vitesse de la tête trop importante pour la puissance (Medrano-Tellez, 2010). À l'opposé, lorsque la vitesse de la tête est très faible et que la vitesse du fil est importante, avec une puissance laser suffisante pour le faire fondre, nous pouvons observer un bain de fusion plus large et plus haut que les autres cordons obtenus, avec un comportement proche de celui d'un liquide. Ce comportement (figure 3b) ressemble alors à celui observé en WAAM, et le cordon obtenu présente de fortes variations avec une couche d'oxydes observable en surface.

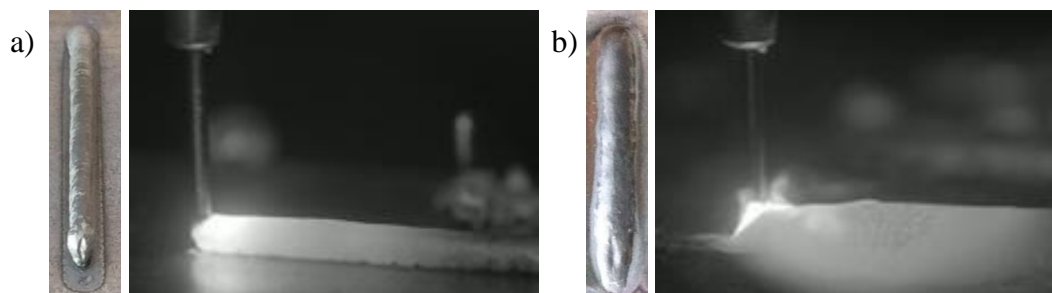


Figure 3 : cordons et images du procédé pour deux défauts : manque de fusion à gauche et comportement liquide à droite

### 3 Protocole d'essais pour caractériser les effets d'angle

Suite aux essais de faisabilité sur le procédé nous avons pu déterminer un point de fonctionnement avec une vitesse de la tête de  $1 \text{ m/min}$ , une vitesse du fil de  $2 \text{ m/min}$  et une puissance de  $2,2 \text{ kW}$ . Ces paramètres ont été obtenus pour une distance de travail de  $-2 \text{ mm}$  ce qui signifie que le point d'intersection des trois faisceaux lasers se situe  $2 \text{ mm}$  sous la surface du substrat (figure 4). Les segments rouges en pointillés

représentent les axes des 3 faisceaux laser, le segment rouge continu l'axe de la tête et le contour en noir représente les limites de la tache laser.

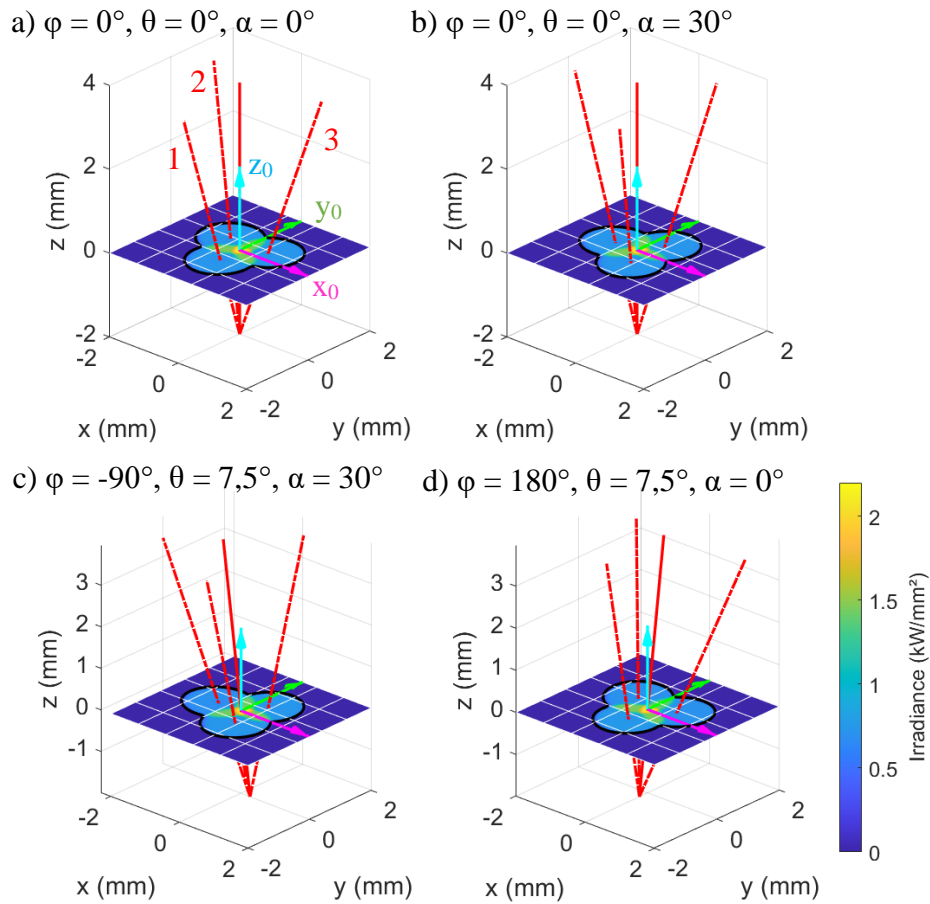


Figure 4 : répartition de puissance et contour de la tache laser pour différentes orientations

Lors de la fabrication les substrats restent fixes et la tête se déplace suivant l'axe  $x_0$  du substrat dans le sens positif, avec différentes orientations en fonction des essais. Pour décrire l'orientation nous choisissons un formalisme d'Euler intrinsèque, correspondant aux successions d'une rotation d'angle  $\varphi$  autour de  $z_0$ , puis d'angle  $\theta$ , que nous appellerons inclinaison, autour de  $x'$  et d'angle  $\psi$  autour de  $z''$ . Nous introduisons également l'angle  $\alpha = \psi + \varphi$ , que nous appellerons rotation propre et qui approxime la rotation totale de la tête autour de son axe lorsque  $\theta$  est faible ( $0,2^\circ$  d'écart pour  $\theta = 7,5^\circ$ ). Les bornes des angles d'orientations sont fixées par des contraintes technologiques (gestion des câbles sur la tête et sécurité laser) : l'angle  $\alpha$  est contraint dans l'intervalle  $[-70^\circ ; 70^\circ]$  et  $\theta$  doit être inférieur à  $8^\circ$ . Pour la conception du plan d'expérience nous choisissons de faire varier  $\theta$  sur deux niveaux entre 0 et  $7,5^\circ$ ,  $\varphi$  sur 8 niveaux entre  $-180$  et  $135^\circ$ , et  $\alpha$  sur 5 niveaux entre  $-60$  et  $60^\circ$ . Seul le niveau  $\varphi = 0^\circ$  a été retenu pour  $\theta = 0^\circ$ . Se faisant, ce sont 45 essais qui ont été menés, avec quatre cordons de 60 mm déposés selon  $x_0$  et espacés de 8 mm par substrat et un temps d'attente de l'ordre d'une minute afin de réduire les possibles effets d'accumulation thermique. Des essais préalables ont établi que les géométries sont indépendantes de l'ordre de fabrication pour ces conditions. Les pièces fabriquées sont ensuite mesurées à l'aide d'un système de mesure 3D optique sur une zone de 3,6 mm par 3,6 mm au centre du cordon. Un balançage numérique est effectué afin de retrouver la direction de dépose  $x_0$ . L'axe  $y_0$  est ensuite subdivisé en 1000

intervalles entre -2 et 2 mm, permettant d'obtenir une distribution de la hauteur locale le long du cordon pour chaque valeur de  $y$ . La valeur moyenne et l'écart type  $\sigma$  de la valeur en  $z$  peuvent alors être déterminés, ce qui permet d'obtenir un profil de cordon statistique sur l'ensemble de la zone mesurée. Un intervalle de confiance à 95% sur les cordons est alors identifié comme  $\pm 1.96 \sigma$  sous hypothèse de répartition gaussienne des valeurs. Grâce à ce profil moyen, il est possible de déterminer les paramètres  $H$ ,  $W$  et  $A$  avec leurs intervalles de confiance, ainsi que  $y_H$  qui représente la position en  $y$  du point de hauteur maximale du cordon par rapport au barycentre. Cette valeur décrit si le cordon est incliné d'un côté.

#### 4 Résultats et discussion

Parmi les 5 cordons réalisés avec  $\theta = 0^\circ$  et  $\alpha$  variant, les angles  $\alpha = -60^\circ$  et  $\alpha = -30^\circ$  présentent du stubbing contrairement aux autres cordons qui ont un aspect lisse (figure 7). Pour le cordon  $\alpha = -60^\circ$  la zone de mesure n'est pas située au centre, mais proche du début du cordon lorsque le stubbing n'est pas apparent. Les évolutions des grandeurs caractéristiques en fonction de l'angle  $\alpha$  sont représentées figure 8. L'intervalle de confiance pour  $\alpha = -30^\circ$  est bien plus grand que pour les autres valeurs, alors que le décalage de la zone de mesure pour  $\alpha = -60^\circ$  permet de ne pas obtenir d'intervalle trop important.

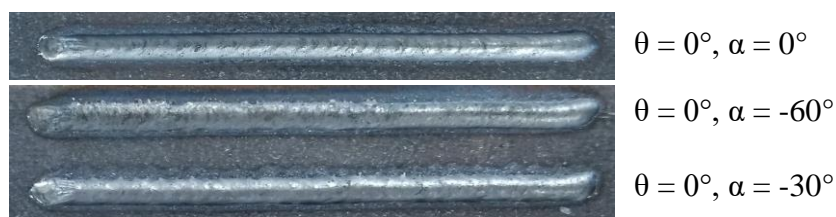


Figure 7 : cordons réalisés avec ou sans stubbing (fabrication de droite à gauche)

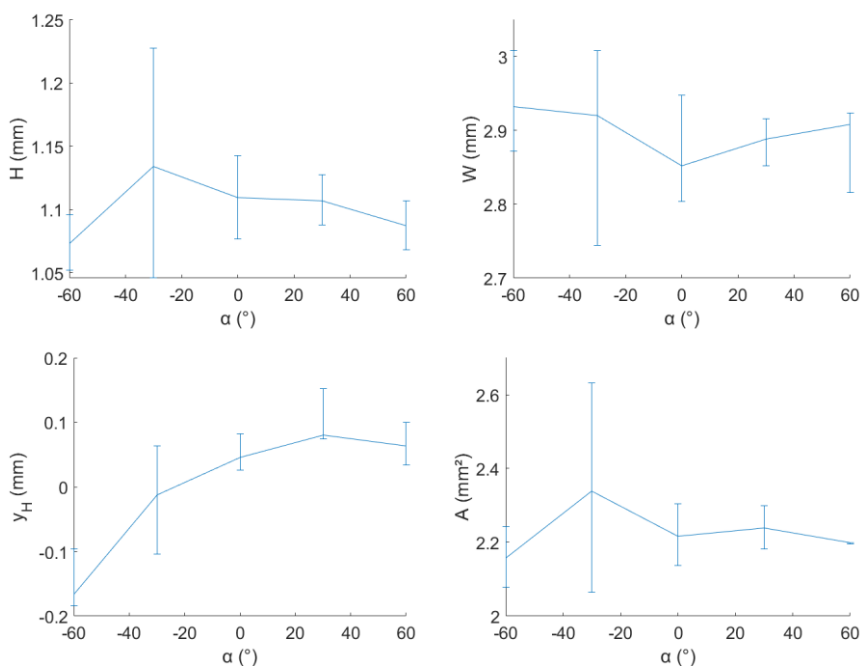


Figure 8 : évolution des grandeurs caractéristiques en fonction de la rotation propre

Ces premiers résultats ne montrent pas d'évolution significative des valeurs en fonction de la rotation propre, sauf pour  $y_H$ . Cette variation de l'ordre de 5% de la largeur des cordons indique que cette rotation sans inclinaison de la tête peut introduire une légère

asymétrie des cordons. Il est notable que la configuration permettant d'obtenir un décalage nul correspond à  $\alpha = -30^\circ$ , configuration qui place le faisceau 3 en avant et les deux autres en arrière, résultant en une répartition symétrique de part et d'autre du cordon. De plus, ce décalage est positif lorsque le faisceau 3 est situé du côté de  $y$  positif, et négatif lorsqu'il est du côté des  $y$  négatifs.

Lors de la réalisation des cordons avec  $\theta = 7,5^\circ$  certaines configurations conduisent à un phénomène de dripping en début de cordon, où une goutte de matière reste accrochée au fil au lieu de se déposer sur le substrat, puis finit par être déposée, conduisant à un départ de cordon décalé (figure 9). La suite des cordons est stable, ce qui indiquerait plutôt un défaut des paramètres de départ du cordon, notamment du temps entre le dévidage du fil et le démarrage du laser (Medrano-Tellez, 2010). Les variations des grandeurs géométriques en fonction de  $\varphi$  pour différentes valeurs de  $\alpha$  sont tracées figure 10. On observe notamment un intervalle de confiance important pour  $\varphi = -135^\circ$ ,  $\alpha = -30^\circ$ , alors que les autres défauts de dripping ne conduisent pas à un intervalle élargi.

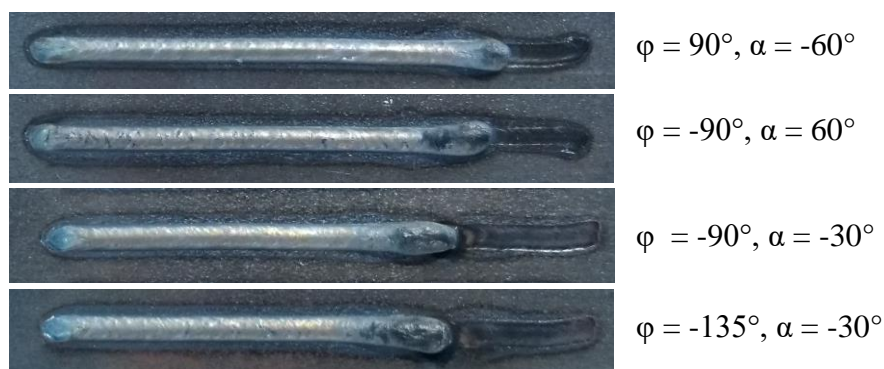


Figure 9 : cordons réalisés avec présence de dripping au début

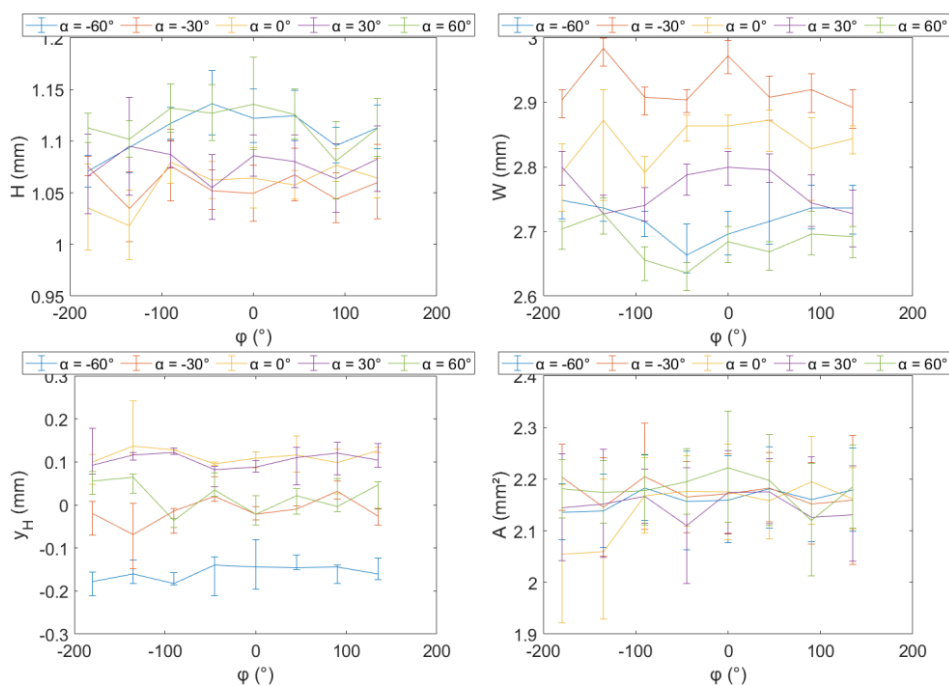


Figure 10 : évolution des grandeurs caractéristiques avec  $\theta = 7,5^\circ$

Les résultats obtenus confirment qu'il n'y a pas de variation significative de l'aire en fonction de l'inclinaison ou de la rotation propre, car les différences entre les valeurs moyennes sont inférieures aux intervalles de confiance. Des évolutions peuvent être



observées pour la largeur et la hauteur, mais elles restent faibles dans l'ordre des 10% et semblent plus liées à la rotation propre qu'à la direction d'inclinaison. Pour aider dans l'analyse des variations de géométrie nous choisissons 5 profils de cordons (figure 11.)

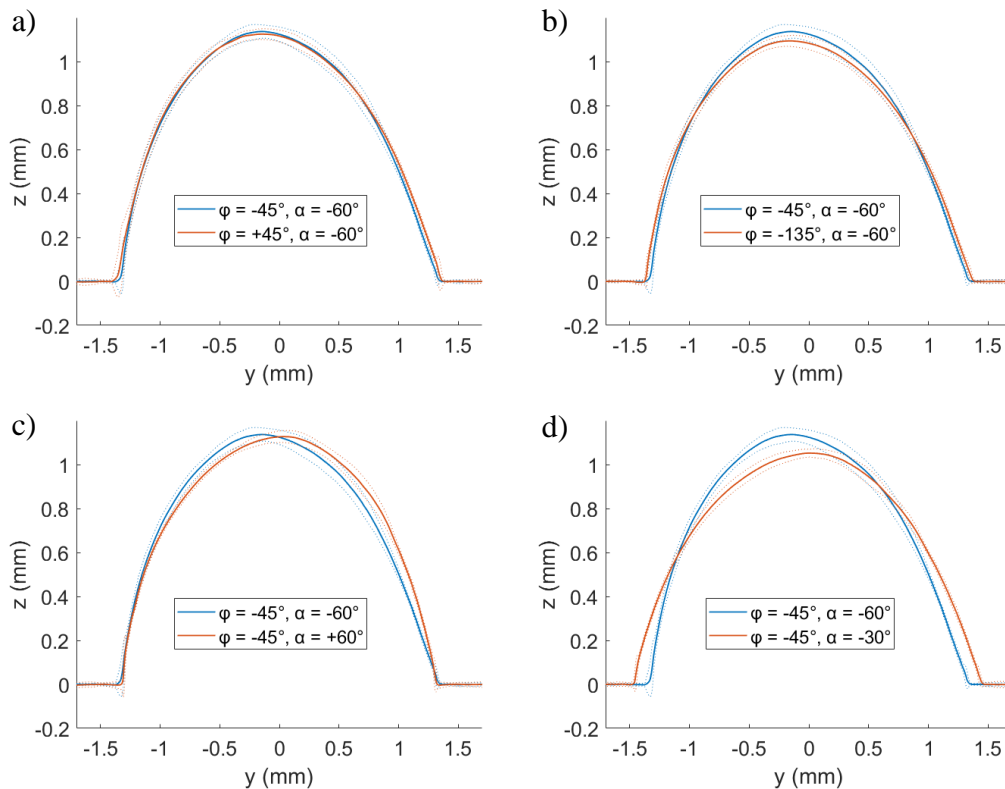


Figure 11 : comparaison de différents profils de cordons en fonction de  $\varphi$  et  $\alpha$ ,  $\theta = 7.5^\circ$

La largeur semble peu dépendre de la direction d'inclinaison, mais plus de la rotation propre lorsque la tête est inclinée (figure 10), alors qu'elle ne semblait pas varier lorsque l'inclinaison était nulle. En effet les largeurs pour  $\alpha = 60^\circ$  sont toujours inférieures à celles obtenues pour  $\alpha = 0^\circ$ , elles-mêmes inférieures à  $\alpha = -30^\circ$ . La figure 11d compare des cordons et illustre cette variation de largeur. Cependant ces variations observées lorsque  $\theta = 7,5^\circ$  ne se retrouvent pas lorsque l'inclinaison est nulle. La largeur maximale est alors obtenue pour  $\alpha = -30^\circ$ , ce qui correspond à la seule configuration testée pour laquelle un faisceau laser est à l'avant du fil et deux faisceaux sont à l'arrière (figure 12).

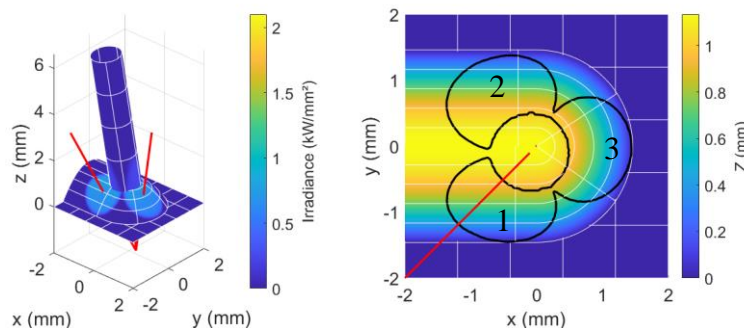


Figure 12 : représentation de la tache laser sur un cordon type avec  $\theta = 7.5^\circ$ ,  $\varphi = -45^\circ$  et  $\alpha = -30^\circ$ , en 3D à gauche et vu de dessus à droite

Les effets de la rotation propre sur le décalage du point de hauteur maximale sont observés à nouveau, et la figure 11c montre l'asymétrie sur le profil complet du cordon entre deux orientations.

Contrairement aux deux grandeurs précédentes, la hauteur présente une dépendance à la direction d'inclinaison. En effet, les variations dues à l'angle  $\varphi$  sont supérieures à celles observées en variant l'angle  $\alpha$ , mais seulement pour  $\alpha = 60$  ou  $-60^\circ$ . La hauteur des cordons dépend donc à la fois de la direction d'inclinaison et de la rotation propre. Pour faciliter les analyses, nous représentons l'axe de la tête pour les différents profils de la figure 11 sur la figure 13.

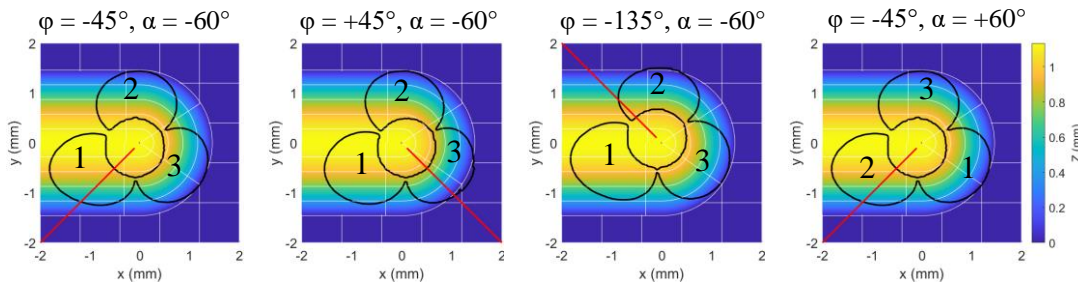


Figure 13 : comparaison des différentes configurations de la figure 11

Nous parlerons par la suite d'inclinaison avant/arrière pour décrire l'angle autour de l'axe  $y_0$ , et d'inclinaison latérale pour décrire celui autour de  $x_0$ . Ainsi entre  $\varphi = -45$  et  $+45^\circ$  l'inclinaison latérale ne varie pas alors que l'inclinaison de la tête est soit vers l'avant ( $\varphi = +45^\circ$ ) ou l'arrière ( $\varphi = -45^\circ$ ) du bain de fusion. La figure 11a montre que cette variation de l'inclinaison de l'avant à l'arrière ne joue pas significativement sur le profil obtenu. La figure 12b montre qu'une modification de l'inclinaison latérale conduit à un changement de hauteur sans influencer sur la largeur. La hauteur maximale est obtenue en inclinant la tête du côté gauche, ce qui correspond au côté où deux faisceaux sont présents. En effet, la figure 13 montre que les configurations  $\alpha = 60$  et  $-60^\circ$  correspondent à des cas où un laser est aligné avec l'axe  $y_0$  et se situe du côté droit ( $y$  positif). Cependant, la configuration  $\alpha = 0^\circ$  correspond également à un faisceau aligné avec l'axe  $y_0$ , mais ne conduit pas à un lien entre  $\alpha$  et  $H$ . Les différences entre  $\alpha = 60$  ou  $-60^\circ$  et  $\alpha = 0^\circ$  sont que dans ce dernier cas le faisceau 1 est aligné alors que ce sont les faisceaux 2 et 3 pour les autres, et qu'il est alors situé à gauche du profil, et non à droite comme pour les autres cas. Ces variations observées peuvent être influencées par des défauts de répartition de puissance entre les faisceaux, ou des défauts de positionnement du fil. Des études supplémentaires permettraient de quantifier leurs effets sur les résultats présentés.

## 5 Conclusion

Dans cet article nous avons étudié l'influence des paramètres d'orientation sur les géométries externes de mono-cordons. Les cordons ont été mesurés pour extraire des profils moyens et intervalles de confiance associés, permettant d'obtenir les dimensions caractéristiques des cordons pour les différentes orientations testées. Les résultats ont permis d'établir que la rotation propre influe principalement sur la largeur et l'asymétrie des cordons, avec des cordons symétriques et larges obtenus lorsqu'un faisceau se trouve à l'avant et deux faisceaux à l'arrière. Lorsqu'un faisceau se retrouve seul du côté du cordon, la hauteur du cordon dépend de l'inclinaison latérale de la tête. Aucune influence de l'inclinaison avant ou arrière n'a été relevée dans cette étude.

Les variations observées, pour un angle d'inclinaison par rapport à la normale jusqu'à 7,5°, sont de l'ordre de 10% des valeurs nominales des cordons. Une inclinaison plus importante pourrait amplifier ces effets, mais nécessiterait dans notre configuration expérimentale d'utiliser le positionneur 2 axes, influant alors la gravité relativement à la pièce. L'étude s'est intéressée aux géométries externes sans étudier les paramètres internes. Or une modification de l'apport de puissance peut entraîner des variations d'interactions entre cordon et substrat. Des analyses supplémentaires sur la dilution et la pénétration permettraient de compléter ce travail.

## Remerciements

Nous remercions Adel Abbas pour l'aide apportée pour les mesures des cordons fabriqués.

## Références

- T.E. Abioye, J. Folkes, A.T. Clare (2013) *A parametric study of Inconel 625 wire laser deposition*, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, No. 12, pp. 2145-2151
- W. Aiyiti, W. Zhao, B. Lu, Y. Tang (2006) *Investigation of the overlapping parameters of MPAW-based rapid prototyping*, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 12, pp. 165-172
- A. Ayed, G. Bras, H. Bernard, P. Michaud, Y. Balcaen, J. Alexis (2020) *Study of Arc-wire and Laser-wire processes for the realization of Ti-6Al-4V alloy parts*, *MATEC Web of Conferences*, Vol. 321
- Y. Cao, S. Zhu, X. Liang, W. Wang (2011) *Overlapping model of beads and curve fitting of bead section for rapid manufacturing by robotic MAG welding process*, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 27, pp. 641-645
- D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li (2015) *A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)*, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 31, pp. 101-110
- F. Du et al. (2019) *Dimensional characteristics of Ti-6Al-4V thin-walled parts prepared by wire-based multi-laser additive manufacturing in vacuum*, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 25, No. 5, pp. 849-856
- G.H. Kim, S.I. Kang, S.B. Lee (2000) *Study on the estimate of weld bead shape and the compensation of welding parameters by considering weld defects in horizontal fillet welding*, *International Conference on Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems*, pp. 212-216
- M. Kumar, S.S. Kumar, A. Sharma (2021) *Bi-polynomial fourth-order weld bead model for improved material utilization and accuracy in wire-arc additive manufacturing: A case of transverse twin-wire welding*, *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, Vol. 2, pp. 100049
- Q. Liu, Y. Wang, H. Zheng, K. Tang, H. Li, S. Gong (2016) *Wire feeding based laser additive manufacturing TC17 titanium alloy*, *Materials Technology*, Vol. 31, No. 2, pp. 108-114
- A.G. Medrano-Tellez (2010) *Fiber laser metal deposition with wire: parameters study and temperature control*, University of Nottingham
- S.H. Mok, G. Bi, J. Folkes, I. Pashby (2008) *Deposition of Ti-6Al-4V using a high power diode laser and wire, Part I: Investigation on the process characteristics*, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 202, No. 16, pp. 3933-3939
- Z. Nie et al. (2016) *Experimental study and modeling of H13 steel deposition using laser hot-wire additive manufacturing*, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 235, pp. 171-186
- S.H. Oliari, A.S.C.M. D'Oliveira, M. Schulz (2017) *Additive Manufacturing of H11 with Wire-Based Laser Metal Deposition*, *Soldagem & Inspeção*, Vol. 22, pp. 466-479
- A. Sharma, N. Arora, B. Mishra (2015) *Mathematical Model of Bead Profile in High Deposition Welds*, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 220, pp. 65-75
- S. Suryakumar, K.P. Karunakaran, A. Bernard, U. Chandrasekhar, R. Nadella, D. Sharma (2011) *Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing*, *Computer-Aided Design*, Vol. 43, pp. 331-344
- J. Xiong, G. Zhang, H. Gao, L. Wu (2013) *Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing*, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 29, pp. 417-423