



HAL
open science

Génération de trajectoire pour l'ajout d'entités par fabrication additive robotisée multi-axes

Maxime Chalvin, Sébastien Campocasso, Vincent Hugel, Thomas Baizeau

► **To cite this version:**

Maxime Chalvin, Sébastien Campocasso, Vincent Hugel, Thomas Baizeau. Génération de trajectoire pour l'ajout d'entités par fabrication additive robotisée multi-axes. 16ème Colloque national S-mart, Apr 2019, Les Karellis, France. hal-02112213v1

HAL Id: hal-02112213

<https://hal.science/hal-02112213v1>

Submitted on 26 Apr 2019 (v1), last revised 20 May 2019 (v2)

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.

Génération de trajectoire pour l'ajout d'entités par fabrication additive robotisée multi-axes

Maxime Chalvin
Université de Toulon,
COSMER
Toulon, France
maxime.chalvin@univ-tln.fr

Sébastien Campocasso
Université de Toulon,
COSMER
Toulon, France
sebastien.campocasso@univ-tln.fr

Vincent Hugel
Université de Toulon,
COSMER
Toulon, France
vincent.hugel@univ-tln.fr

Thomas Baizeau
Poly-Shape
235 rue des Canesteu
Salon de Provence, France
t.baizeau@poly-shape.com

Résumé— La fabrication additive représente de forts enjeux industriels en ouvrant de nouvelles possibilités quant à la conception et à la manière de fabriquer les pièces. Cependant, cette méthode de production n'est pas adaptée pour les volumes de pièces importants. La conjoncture actuelle demandant une forte personnalisation de la production de masse, la fabrication additive peut être une alternative économique aux moyens de production traditionnels, permettant une rationalisation des entités identiques de pièces, produites alors via des moyens conventionnels, puis un ajout d'entités personnalisées. La fabrication additive permet aussi le réemploi de pièces, en les réparant par rechargement de matière, ou bien en ajoutant des fonctionnalités pour offrir une seconde vie à ces dernières. Ce document présente une méthode de génération de trajectoire, appliquée aux tubulures à parois minces, permettant l'ajout d'entités présentant un porte-à-faux important sur une pièce pré-existante et sans utilisation de matériau support, diminuant ainsi le temps de fabrication et la quantité de matériau à déposer. La trajectoire de fabrication est générée de manière à ce que la distance locale entre les couches soit homogène tout le long de cette dernière et les axes outils déterminés de manière à supprimer l'utilisation de matériau support. Enfin, un essai expérimental a été mené afin de valider la trajectoire générée.

Mots-clés— Fabrication additive, Multi-axes, Tubulures

I. INTRODUCTION

La fabrication additive robotisée est amenée à prendre une part de plus en plus importante de la production industrielle actuelle en permettant la fabrication de petites séries de pièces de formes complexes de manière plus aisée et moins coûteuse qu'avec des moyens de production conventionnels [1, 2]. Cependant, dans le cas de grandes séries de pièces, le coût unitaire de chaque pièce produite par fabrication additive a tendance à rester constant contrairement aux pièces fabriquées via des moyens conventionnels dont le prix est inversement proportionnel au volume produit [3].

Si la fabrication additive n'est alors pas le moyen de production le plus adapté dans le cas des produits de forte consommation, Atzeni et Salmi [3] montrent que la tendance actuelle est à la personnalisation de masse, ce qui implique un fort nombre de variantes pour un produit donné, voir Figure 1. Une manière de réduire le coût de fabrication de ce type de production est d'utiliser les outils de fabrication de masse pour produire l'ensemble des ressources communes aux différentes variantes, puis d'ajouter des entités sur ces pièces de base pour parvenir au produit fini [5, 6, 7]. Cet ajout d'entités permet

notamment de créer des pièces de formes complexes à partir de pièces de formes simples telles que des cylindres à section circulaires [8].

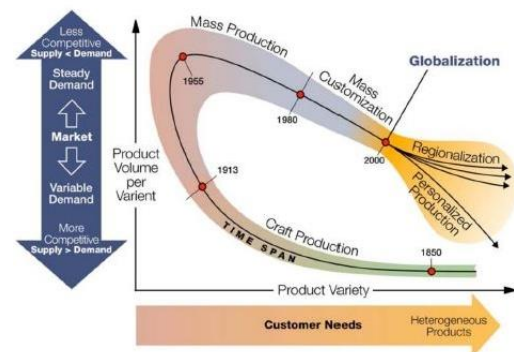


Figure 1. Evolution du volume de produits fabriqués en fonction de la variété de produits au cours du temps, [4]

L'ajout d'entités de formes complexes permet aussi d'effectuer la réparation de pièces usées ou endommagées. En effet, une fois le défaut identifié, il est possible de combler un manque de matière ou de refabriquer une partie de la pièce [9, 10, 11, 12]. En plus de la réparation ou de la refabrication d'entités, il est possible de procéder à de l'ajout de fonctionnalité sur des pièces ou de les reconverter via des modifications apportées par fabrication additive pour permettre leur ré-emploi dans d'autres mécanismes [13, 14] et ainsi diminuer l'impact écologique global de l'utilisation du mécanisme dans lequel elles sont utilisées.

Cependant, pour la fabrication d'entités présentant un porte-à-faux important, il peut être difficile ou même impossible d'utiliser du matériau support, notamment dans le cas d'utilisation de matériaux métalliques. Il faut alors procéder à plusieurs dépôts en niveaux de z (2,5D) de manière indexée [15, 16, 17] ou utiliser des trajectoires 3D multi-axes [15, 18]. Si les premières sont adaptées pour les entités avec peu ou pas de porte-à-faux, il est nécessaire d'utiliser des trajectoires 3D multi-axes dans le cas contraire. Pour procéder au rajout d'entités sur des pièces déjà existantes en utilisant les trajectoires citées ci-dessus, il est essentiel d'utiliser des systèmes de dépôt possédant à minima 5 axes, permettant d'assurer le suivi de la trajectoire mais aussi l'orientation de l'outil de dépôt, variable au cours de la fabrication dans le cas des trajectoires 3D multi-axes [18, 19].

Ce document présente une manière de générer des trajectoires 3D multi-axes permettant la fabrication additive à partir d'une surface non plane sans utilisation de matériau support. Cette génération de trajectoire s'accompagne d'une méthode d'homogénéisation des distances entre passes, d'une génération numérique des axes outils en chaque point de la trajectoire et d'une démonstration expérimentale.

II. TRAJECTOIRE DE FABRICATION

La trajectoire de fabrication est constituée par une trajectoire de dépôt et une orientation de l'outil de dépôt (axe outil). La stratégie utilisée pour définir l'orientation de l'outil de dépôt nécessite d'avoir la donnée de la trajectoire de dépôt. Celle-ci sera calculée et optimisée dans un premier temps, et finalement les axes outils seront définis.

Variable	Définition
r	Rayon du tore
R	Rayon de courbure du tore
Δ_{passe}	Distance entre deux couches successives, fixée
R_c	Rayon du cylindre recevant l'entité à ajouter

Tableau 1. Nomenclature

A. Cas d'étude

La pièce étudiée consiste en un tube cylindrique creux et une entité à ajouter (tubulure torique), voir Figure 2.

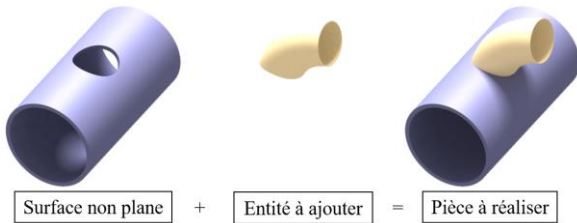


Figure 2. CAO de la pièce à réaliser

Le cylindre creux est une pièce préexistante à laquelle il faut ajouter un coude au niveau de l'ouverture. Si la solution de la fabrication additive est retenue, il est essentiel que le coût de cette solution soit le plus faible possible avec une mise en œuvre la plus rapide possible. De plus, si la géométrie de l'entité à ajouter nécessite l'utilisation de matériau support, son retrait peut être compromis si l'accès à l'intérieur du tube est impossible, et son dépôt peut être difficile. C'est pourquoi il est souhaitable de s'en passer [1, 2]. La trajectoire de dépôt retenue est donc une trajectoire 3D multi-axes qui sera définie par la suite.

B. Définition de la trajectoire de dépôt sur surface courbe

La trajectoire de dépôt sur une surface courbée peut être définie de différentes manières. Une première manière consiste à déposer un ensemble de cordons parallèles entre eux et à les empiler de manière à approximer la surface courbée [20, 21, 22]. Cette technique créant un effet « marche d'escalier » ainsi que de mauvaises caractéristiques mécaniques pour la pièce fabriquée [21], la trajectoire de dépôt la plus appropriée est une trajectoire basée sur une courbe gauche, issue de l'intersection de la surface courbée et de la pièce à fabriquer, voir Figure 3.

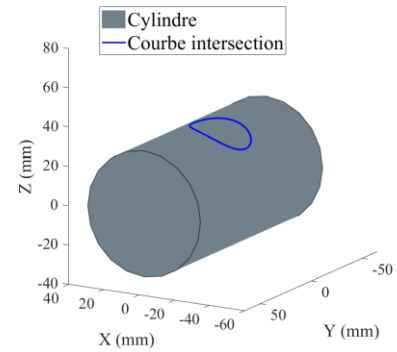


Figure 3. Courbe intersection entre le cylindre et le tore

Afin de réaliser l'entité à ajouter, la trajectoire de dépôt est définie comme une trajectoire 3D multi-axes non plane adaptée au quart de tore [19], déjà définie dans le cas d'un dépôt sur une surface plane. La Figure 4 et l'équation (1) définissent le paramétrage mathématique du tore.

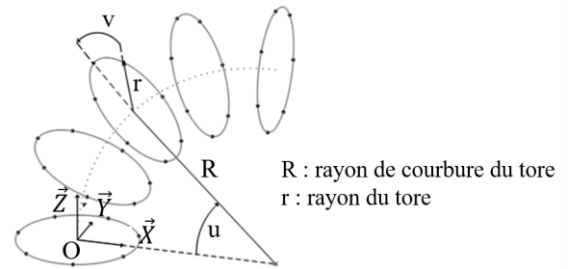


Figure 4. Paramétrage mathématique du tore

$$\begin{aligned} X &= (R + r \cdot \cos(v)) \cdot \cos(u) - R \\ \text{éq. (1): } Y &= r \cdot \sin(v) \\ Z &= (R + r \cdot \cos(v)) \cdot \sin(u) \end{aligned}$$

Chaque point de la trajectoire $M_{i,j}$ est défini par un couple de paramètres $(u_{i,j}, v_j)$, avec j le paramètre de discrétisation donnant le nombre de points par couche (j_{max}) et i le nombre de couches de la trajectoire de dépôt. Or, d'après la définition de la trajectoire choisie, chaque paramètre $u_{i,j}$ dépend du paramètre $u_{i-1,j}$ et de Δ_{passe} , paramètre fixé.

Pour le calcul de la trajectoire, la distance entre deux points à iso paramètre v est définie comme étant égale à Δ_{passe} [19], voir équation (2).

$$\begin{aligned} \Delta_{passe} &= \left\| \overrightarrow{M_{u,v} M_{u+1,v_j}} \right\| \\ \text{éq. (2): } u_{i,j} &= u_{i-1,j} + \arccos \left(1 - \frac{\Delta_{passe}^2}{2 \cdot (R+r \cdot \cos v_j)^2} \right) \end{aligned}$$

Pour déterminer la trajectoire de dépôt, il faut connaître les paramètres $u_{0,j}$, et donc commencer par calculer la trajectoire de la première couche.

Cette trajectoire est fonction des paramètres $u_{i,j}$ (équation (3)) de la courbe d'intersection des deux géométries (Figure 3, équation (4)).

$$i = 0$$

$$j \in \llbracket 1, j_{\max} \rrbracket$$

éq. (3):

$$u_{i,j} = \arccos\left(\frac{R^2 - R_c^2 + (R+r \cdot \cos v_j)^2}{2 \cdot R \cdot (R+r \cdot \cos v_j)}\right)$$

$$j \in \llbracket 1, j_{\max} \rrbracket$$

éq. (4):

$$X_{courbe,j} = R_c \cdot \left(\frac{(R+r \cdot \cos v_j) \cdot \cos u_{0,j} - R}{R_c}\right)$$

$$Y_{courbe,j} = r \cdot \sin v_j$$

$$Z_{courbe,j} = R_c \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{(R+r \cdot \cos v_j) \cdot \cos u_{0,j} - R}{R_c}\right)\right)$$

Les paramètres $u_{i,j}$ de la première couche étant définis, il est possible de définir ceux des couches suivantes en se servant des équations (1) et (2).

La trajectoire obtenue est visible sur la Figure 5.

Pour permettre une meilleure observation, Δ_{passe} est fixé à 5 mm pour les figures représentant les trajectoires.

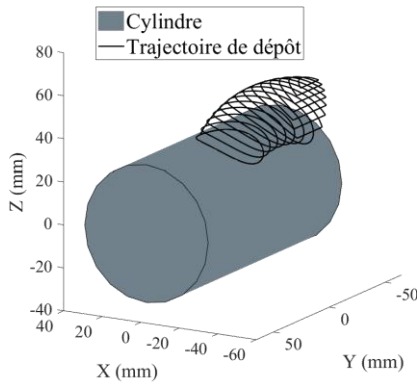


Figure 5. Trajectoire de dépôt initiale

C. Optimisation de la distance inter-couches

Si l'on observe la distance réelle entre les couches pour la trajectoire visible sur la Figure 5, on s'aperçoit que celle-ci n'est pas égale à Δ_{passe} en tout point de la trajectoire mais a tendance à diminuer, voir Figure 6.

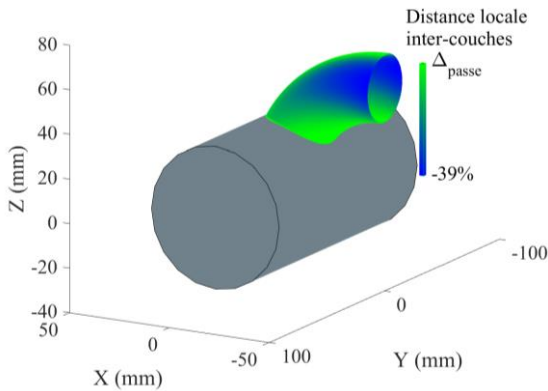


Figure 6. Distance locale entre couches le long de la trajectoire de dépôt

Cette diminution de la distance locale entre les couches est due au fait que pour un point j sur une couche i , le point de la couche supérieure le plus proche n'est pas forcément le point à iso-paramètre v , voir Figure 7.

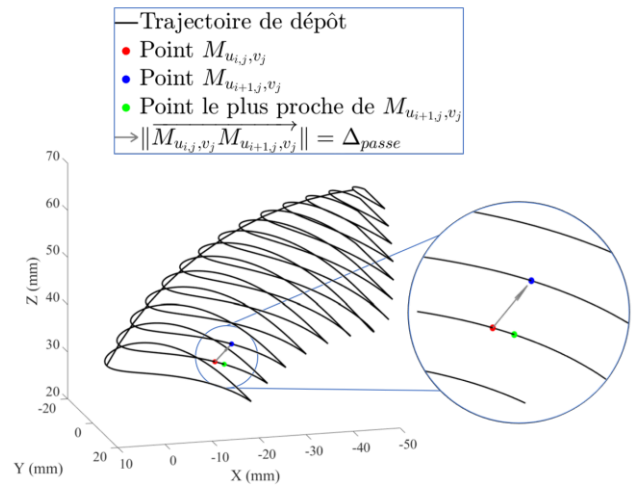


Figure 7. Distance locale entre couches

Pour obtenir une distance entre couches réelle égale à Δ_{passe} tout le long de la trajectoire, le calcul de la trajectoire est optimisé à partir des équation (1) et (5).

éq. (5):

$$u'_{i,j} = u'_{i-1,j} + \arccos\left(1 - \frac{\Delta_{i,j}^2}{2 \cdot (R+r \cdot \cos(v_j))^2}\right)$$

$$\Delta_{i,j} = \Delta_{passe} \pm \epsilon_{i,j}$$

Le paramètre $\epsilon_{i,j}$ est déterminé via une méthode d'optimisation (fonction d'erreur à minimiser : équation (6)) afin d'obtenir une distance locale réelle entre couches égale à Δ_{passe} , à 10^{-4} mm près.

éq. (6):

$$f(\epsilon_{i,j}, \Delta_{passe}) = (d_{i,j} - \Delta_{passe})^2$$

$d_{i,j}$: distance à la couche inférieure au point $M_{i,j}$

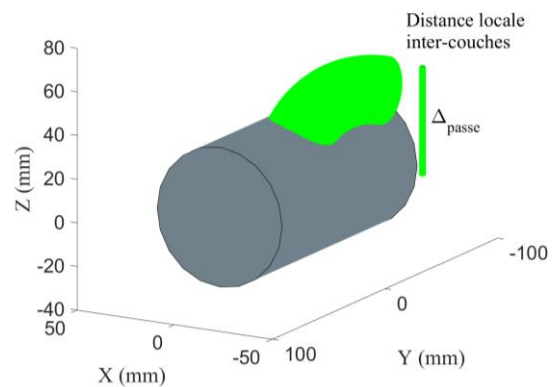


Figure 8. Distance réelle entre couches après optimisation

On peut remarquer sur la Figure 9 que le paramètre $\Delta_{i,j}$ varie fortement lors de la génération des points $M_{i,j}$. Cette variation à la hausse s'explique par le fait qu'il faut générer le point $M_{u_{i+1,j}, v_j}$ de la couche suivante (point bleu sur la Figure 7) à une distance supérieure du point à iso paramètre v de la couche inférieure $M_{u_{i,j}, v_j}$ de manière à ce que la distance entre la

couche inférieure et la couche en cours de génération soit égale à Δ_{passe} au point $M_{u_{i+1,j},v_j}$.

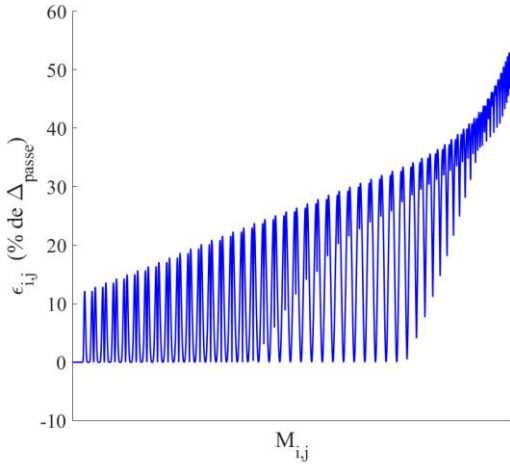


Figure 9. Evolution de $\epsilon_{i,j}$ en pourcentage de Δ_{passe}

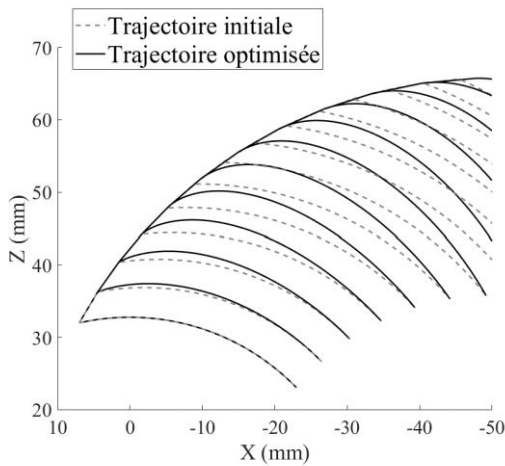


Figure 10. Comparaison des trajectoires avant et après optimisation

En comparant les trajectoires pré et post optimisation de $\epsilon_{i,j}$, voir Figure 10, le nombre de couches nécessaires à la fabrication avec la trajectoire optimisée est inférieur à celui de la trajectoire initiale. De plus, étant donné la constance de la distance entre couches, il n'est pas nécessaire de faire varier les conditions de dépôt pour obtenir différentes hauteurs de couches [19, 23, 24, 25]. Cela permet aussi de conserver des caractéristiques mécaniques uniformes grâce à la constance de la paramétrie de dépôt [23, 26, 27].

Pour pouvoir procéder à la fabrication avec la trajectoire de dépôt et un moyen de fabrication multi-axes, il est nécessaire de définir les axes outils pour permettre la bonne orientation de l'outil de dépôt et éviter ainsi l'affaissement de la matière due à la gravité.

D. Définition des axes outils

Les axes outils sont définis en chaque point de la trajectoire, via une direction de fabrication tangente à la surface et normale à la trajectoire et deux angles de dépinçage [19], voir Figure 11.

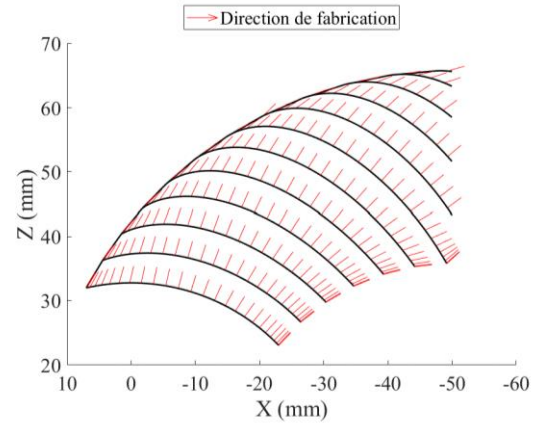


Figure 11. Vecteurs direction de fabrication en chaque point de la trajectoire

Afin de limiter les collisions entre l'outil de dépôt et le montage de fabrication, comprenant le cylindre et le support du cylindre (voir Figure 14), les axes outils ont été projetés dans le plan de symétrie de la géométrie avec des angles de dépinçage nuls (les vecteurs axes outils sont alors confondus avec les vecteurs direction de fabrication projetés dans le plan cité précédemment), permettant ainsi une unique rotation de l'outil de dépôt autour de l'axe \vec{y} .

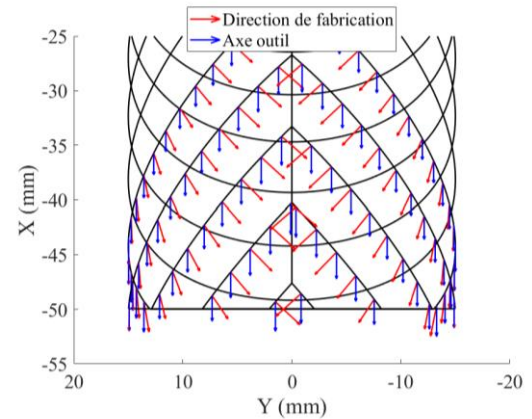


Figure 12. Direction de fabrication et axes outils (représentation pour les cinq dernières couches)

La trajectoire de fabrication étant maintenant complète, il est possible de procéder à un essai expérimental permettant de valider la trajectoire proposée.

III. VALIDATION EXPERIMENTALE

A. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé est composé d'un bras robotisé Stäubli RX60BL et d'un dispositif de dépôt de polymère (acide polylactique ou PLA) conçu pour cette application, permettant de maximiser l'accessibilité pour la fabrication. Le dispositif expérimental est visible sur la Figure 13.

Le choix du matériau polymère par rapport à un matériau métallique permet de fiabiliser le processus de génération de trajectoire en permettant un risque moindre de casse matériel en cas de collision, en étant moins influencé par la distance entre l'outil de dépôt et la pièce en cours de fabrication tout en minimisant les coûts d'investissement. Les conditions

opérateurs pour le robot sont cependant relativement proches de ce qui peut se faire pour du dépôt de fil métallique, la vitesse d'avance utilisée pour le fil polymère étant de 6 mm/s, proche des vitesses d'avance maximales utilisées pour les procédés de dépôt de fil métallique les plus rapides (utilisant la technologie CMT - Cold Metal Transfert -) [28].

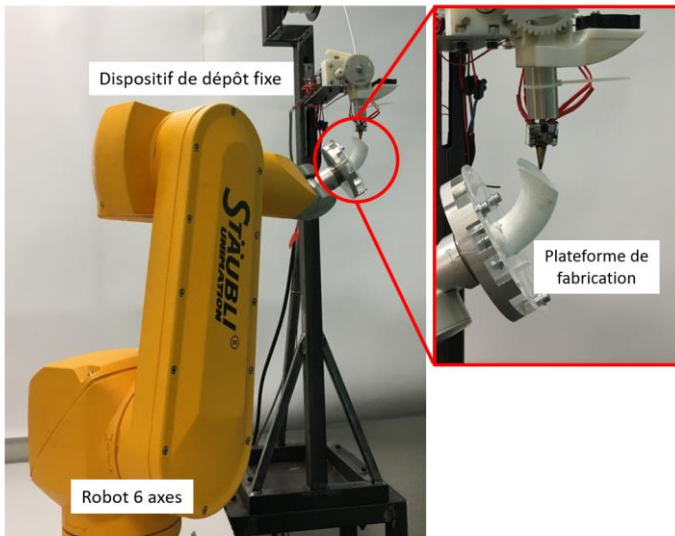


Figure 13. Dispositif expérimental

La configuration utilisée pour les essais expérimentaux consiste en un outil de dépôt fixe et une plateforme de fabrication située en bout du robot. Ce type de configuration permet de minimiser le nombre d'axes nécessaires (5) pour avoir une influence de la gravité fixée au point de dépôt par rapport à une configuration avec un outil de dépôt mobile, nécessitant alors 5 axes pour le bras robotisé et 2 axes pour la plateforme de fabrication.

L'utilisation de la stratégie de pilotage pour obtenir une vitesse correcte au point de dépôt s'appuie sur une trajectoire déclarée sous la forme de jauges outils [19]. En effet, le contrôleur pilote la vitesse du robot au niveau d'un point déclaré, habituellement au bout de l'axe terminal lorsque la jauge outil est nulle. La géométrie fabriquée étant en constante évolution, la vitesse d'avance atteinte au point de dépôt est dépendante de la vitesse d'avance au niveau du point piloté et de la combinaison des vitesses de rotation et de la distance entre le point piloté et le point de dépôt. Afin de respecter au mieux la vitesse atteinte au point de dépôt, le pilotage du robot se fait en déclarant un point à atteindre (l'origine programme) et en faisant varier les jauges outils (correspondant aux coordonnées X, Y, Z, R_x, R_y, R_z des points de la trajectoire dans l'espace pièce par rapport à l'origine programme). De fait, la combinaison vitesse de rotation/distance entre point piloté et point de dépôt est prise en compte par le contrôleur pour assurer la vitesse désirée au point de dépôt.

B. Résultats d'essai

Le cylindre sur lequel l'entité doit être ajoutée est une portion de tube PVC d'un rayon $R_c = 32$ mm. Ce matériau a été choisi car il permet une accroche du PLA satisfaisante pour pouvoir fabriquer l'intégralité de l'entité.

Afin de maintenir le cylindre sur lequel doit s'effectuer le dépôt, un support a été créé, l'origine programme est prise au

milieu du cylindre, sur sa partie supérieure et de manière à ce que l'outil de dépôt soit normal à la surface.

L'essai de fabrication réalisé est visible sur la Figure 14.

On peut remarquer des excès de dépôt sphériques sur certaines parties de la pièce. Ce surplus de dépôt est dû à l'incapacité du robot à charger chaque sous-programme – la mémoire interne du robot étant limitée, le programme de fabrication est morcelé sous la forme de sous-programmes et stocké sur une mémoire externe - tout en continuant le mouvement. L'inertie de dépôt génère ces surplus de matière avant que l'apport de fil ne soit stoppé.

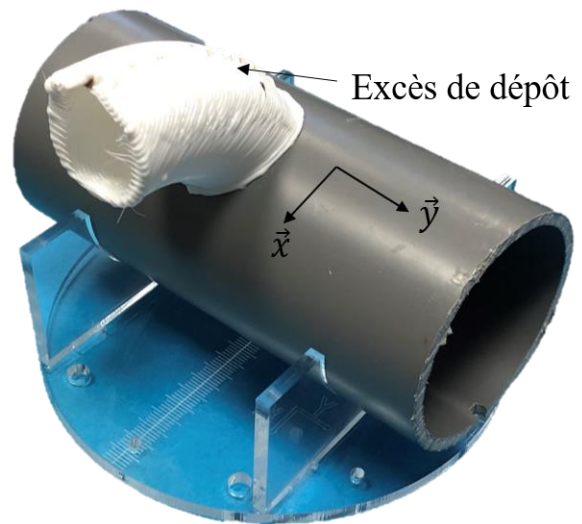


Figure 14. Résultat de l'essai expérimental

D'autres défauts présents sur la pièce peuvent s'expliquer à cause de la dynamique du robot. En effet, certaines portions de la trajectoire de fabrication peuvent nécessiter de fortes variations angulaires des axes du robot, notamment les zones présentant une discontinuité en tangence (cf. Figure 12). Si les capacités dynamiques et/ou cinématiques du robot sont insuffisantes, la vitesse d'avance au point de dépôt est diminuée, ce qui induit une paroi plus épaisse et un potentiel défaut de forme.

IV. CONCLUSION

D'après l'expérimentation menée, l'ajout d'entité ayant un fort porte-à-faux sur des géométries préexistantes par fabrication additive multi-axes est possible sans matériau support.

De plus, la génération de trajectoire 3D multi-axes avec des distances locales inter-couches identiques tout le long de la trajectoire permettent une fabrication sans modification des conditions opératoires, ce que ne permet pas le premier type de trajectoire ni les trajectoires multi-axes ayant des couches normales à la fibre neutre de la géométrie [19]. Ce type de trajectoire permet aussi de minimiser le nombre de couches nécessaires à la fabrication de la géométrie, apportant alors un gain de temps de fabrication. La constance des conditions opératoires de dépôt ainsi que la diminution du nombre de couches et donc du nombre de cycles de départ/fin de dépôt devraient permettre d'obtenir une meilleure santé matière dans le cas de la fabrication métallique.

Cependant, avant de transposer ce type de fabrication à des matériaux métalliques, et donc à une échelle industrielle, il

faudra veiller à prendre en compte le défaut de forme de la surface sur laquelle le dépôt va avoir lieu ainsi que la dynamique/cinématique du robot afin de minimiser les écarts géométriques lors du suivi de la trajectoire, les moyens de dépôt métallique étant plus sensibles en cas d'écart de distance et/ou d'orientation entre l'outil de dépôt et la pièce. Enfin, l'aspect thermique présent lors du dépôt de matériaux métalliques n'est pas abordé avec l'utilisation de polymère. Il sera donc essentiel de prendre en compte les déformations liées à la thermique de la pièce lors de la génération de trajectoire.

V. REFERENCES

- [1] Cunningham, C., Wikshåland, S., Xu, F., Kemakolam, N., Shokrani, A., Dhokia, V., and Newman, S. (2017). Cost modelling and sensitivity analysis of wire and arc additive manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 11 :650–657.
- [2] Williams, S. and Martina, F. (2015). Wire + arc additive manufacturing vs. traditional machining from solid: a cost comparison. Technical report. Welding Engineering and Laser Processing Centre, Cranfield University.
- [3] Atzeni, E. and Salmi, A. (2012). Economics of additive manufacturing for end-useable metal parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(9) :1147–1155.
- [4] Koren, Y. (2010). *The global manufacturing revolution: product-process-business integration and reconfigurable systems*. John Wiley & Sons.
- [5] Dröder, K., Heyn, J. K., Gerbers, R., Wonnemberg, B., and Dietrich, F. (2016). Partial additive manufacturing: Experiments and prospects with regard to large series production. *Procedia CIRP*, 55 :122–127.
- [6] Zhao, X., Pan, Y., Zhou, C., Chen, Y., and Wang, C.C. (2013). An integrated CNC accumulation system for automatic building-around-inserts. *Journal of Manufacturing Processes*, 15(4) :432–443
- [7] Reichler, A.-K., Gerbers, R., Falkenberg, P., Türk, E., Dietrich, F., Vietor, T., and Dröder, K. (2018). Incremental manufacturing: Model-based part design and process planning for hybrid manufacturing of multi-material parts. In *Proceedings of CIRP ICME, Naples, Italy, 18-20/07/18*.
- [8] Yili, D., Shengfu, Y., Yusheng, S., Tianying, H., and Lichao, Z. (2018). Wire and arc additive manufacture of high-building multi-directional pipe joint. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96: 2389-2396.
- [9] Touzé, S., Rauch, M., and Hascoët, J.-Y. (2018). Segmentation method for automated repair with an additive manufacturing process. In *Proceedings of MUGV, Bordeaux, France 07-08/06/18*.
- [10] Kin, S. T. M., Ong, S., and Nee, A. (2014). Remanufacturing process planning. *Procedia CIRP*, 15 :189–194.
- [11] Navrotsky, V. and CTO, P. (2014). 3D printing at siemens power service.
- [12] Paris, H., Mandil, G., et al. (2018). The development of a strategy for direct part reuse using additive and subtractive manufacturing technologies. *Additive Manufacturing*, 22 :687–699.
- [13] Tolio, T., Bernard, A., Colledani, M., Kara, S., Seliger, G., Dufloy, J., Battaia, O., and Takata, S. (2017). Design, management and control of demanufacturing and remanufacturing systems. *CIRP Annals*, 66(2) :585–609.
- [14] Newman, S. T., Zhu, Z., Dhokia, V., and Shokrani, A. (2015). Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies. *CIRP Annals*, 64(1) :467–470.
- [15] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Larkin, N., and Van Duin, S. (2016). Automatic multi-direction slicing algorithms for wire based additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 37 :139–150
- [16] Ren, L., Sparks, T., Ruan, J., and Liou, F. (2008). Process planning strategies for solid freeform fabrication of metal parts. *Journal of Manufacturing Systems*, 27(4) :158–165.
- [17] Ruan, J., Eiamsa-ard, K., and Liou, F.W. (2005). Automatic process planning and toolpath generation of a multi-axis hybrid manufacturing system. *Journal of Manufacturing Processes*, 7(1) :57–68.
- [18] Zhao, G., Ma, G., Feng, J., and Xiao, W. (2018). Nonplanar slicing and path generation methods for robotic additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96: 3149-3159.
- [19] Chalvin, M., Campocasso, S., Baizeau, T., and Hugel, V. (2018). Automatic multi-axis path planning for thinwall tubing through robotized wire deposition. In *Proceedings of CIRP ICME, Naples, Italy, 18-20/07/18*.
- [20] Singamneni, S., Roychoudhury, A., Diegel, O., and Huang, B. (2012). Modeling and evaluation of curved layer fused deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(1) :27–35.
- [21] Jin, Y., Du, J., He, Y., and Fu, G. (2017). Modeling and process planning for curved layer fused deposition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(1-4): 273–285.
- [22] Chakraborty, D., Reddy, B. A., and Choudhury, A. R. (2008). Extruder path generation for curved layer fused deposition modeling. *Computer-Aided Design*, 40(2) :235–243.
- [23] Shamsaei, N., Yadollahi, A., Bian, L., and Thompson, S. M. (2015). An overview of direct laser deposition for additive manufacturing; part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control. *Additive Manufacturing*, 8 :12-35.
- [24] Ma, W., But, W.-C., and He, P. (2004). Nurbs-based adaptive slicing for efficient rapid prototyping. *Computer-Aided Design*, 36(13) :1309–1325.
- [25] Wulle, F., Coupek, D., Schäffner, F., Verl, A., Oberhofer, F., and Maier, T. (2017). Workpiece and machine design in additive manufacturing for multi-axis fused deposition modeling. *Procedia CIRP*, 60 :229 – 234.
- [26] Spencer, J., Dickens, P., and Wykes, C. (1998). Rapid prototyping of metal parts by three-dimensional welding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 212(3) :175–182.
- [27] Brandl, E., Michailov, V., Viehweger, B., and Leyens, C. (2011). Deposition of Ti–6Al–4V using laser and wire, part I: Microstructural properties of single beads. *Surface and Coatings Technology*, 206(6) :1120–1129.
- [28] Adeyinka Adebayo, Jorn Mehnen, and Xavier Tonnellier. Limiting travel speed in additive layer manufacturing. 2012.