



Automatisation du processus de réparation de défauts de pièces de moulage en acier par soudage

Thanh Hoang Vo, Christelle Grandvallet, Frédéric Vignat, Eddy Bernou, Antonin Bermond

► To cite this version:

Thanh Hoang Vo, Christelle Grandvallet, Frédéric Vignat, Eddy Bernou, Antonin Bermond. Automatisation du processus de réparation de défauts de pièces de moulage en acier par soudage. S-MART 2023 : 18ème Colloque national S.mart, Arts et Métiers Paristech ENSAM Aix-en-Provence, Université de Toulon [UTLN], Apr 2023, Carry-le-Rouet, France. ⟨hal-04278695⟩

HAL Id: hal-04278695

<https://hal.science/hal-04278695v1>

Submitted on 10 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Automatisation du processus de réparation de défauts de pièces de moulage en acier par soudage

Thanh Hoang Vo ^{a,*}, Christelle Grandvallet ^a, Antonin Bermond ^b, Eddy Bernou ^c, Frédéric Vignat ^a

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

^b Safe Metal, 1 Boulevard de la Boissonnette, 42110 Feurs, France

^c Axive Additive, 74 Rue des Acières 42000 Saint Etienne, France

* e-mail : thanh-hoang.vo@grenoble-inp.fr

1. INTRODUCTION

Le moulage en sable à vert est l'un des procédés les plus courants pour fabriquer les composants en acier. La coulée de sable vert est utilisée pour une grande variété d'applications de moulage, que ce soit des moules de petite taille ou des grands moules pesant jusqu'à 500 kg [1]. La coulée de sable à vert est en effet une méthode simple, évolutive et résiliente pour la coulée des métaux [2]. En termes de contrôle de la qualité, l'ajout en petites quantités d'oxyde de fer au sable vert permet d'empêcher la pénétration du métal dans le sable et la fissuration du moule [3].

Il y a souvent des défauts dans une pièce obtenue par moulage. Les défauts courants dans les pièces moulées en métal peuvent être divisés en cinq catégories : trous ; fissures ; défauts de surface, formes, tailles et poids non qualifiés ; composants, structures et propriétés non qualifiés [4].

La réparation des défauts de moulage doit être effectuée sans affecter la qualité du produit et conformément aux normes et réglementations techniques applicables selon le domaine d'application. La réparation par soudage est l'un des principaux processus de réparation des pièces en acier moulées. Pratiquement tous les défauts de coulée sur les pièces moulées en acier peuvent être réparés par soudage et pour cela, le soudage à l'arc est largement utilisé.

Toutefois, la réparation de pièces moulées en acier se fait aujourd'hui manuellement par les soudeurs. Le processus de réparation s'effectue en général en 3 étapes (Figure 1) : identifier les pièces avec défauts, creuser la zone de défauts manuellement par un soudeur, et remplir la zone creusée.

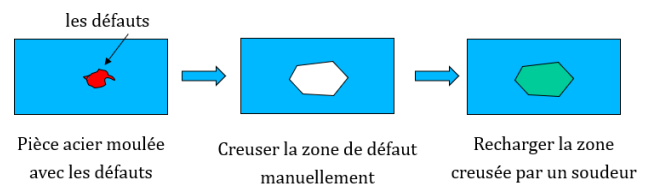


Figure 1 - Processus de la réparation par le soudeur

La qualité de la réparation dépend de l'expérience du soudeur quant aux paramètres de soudage et à la stratégie de remplissage. Dans cet article, nous souhaitons explorer l'idée d'automatiser la troisième étape de ce processus.

Cette étude est réalisée dans le cadre d'un projet de collaboration entre le laboratoire G-SCOP et trois sociétés: Safe Metal (leader mondial pour les composants acier moulé en sable à vert), Axive Additive (spécialisée en fabrication additive métallique et en rechargement robotisé) et Visioshape (spécialisée en scan 3D, rétro-conception et système vision).

Cet article présentera tout d'abord la problématique et question de recherche. Ensuite l'état de l'art sur la méthode de génération de trajectoires à partir du maillage et les stratégies de remplissage sont présentés. Dans la section suivante un modèle de génération de trajectoires à partir d'un maillage est détaillé. Celui-ci est mis en application à travers une étude de cas qui permet de valider nos résultats. Enfin, une vue globale de nos résultats et les opportunités pour la suite sont présentés en conclusion de cet article.

2. PROBLEMATIQUE ET QUESTION DE RECHERCHE

L'objectif de cette étude est d'utiliser un robot de soudage pour recharger la zone creusée à la place d'un soudeur. Pour ce faire, il faut modéliser la forme et générer la trajectoire du robot afin de recharger cette

forme. Un processus de remplissage par un robot de soudage utilisé chez Axive Additive est présenté en Figure 2.

La première étape dans cette méthode est de numériser la pièce moulée et son défaut à réparer parce que la zone de défaut a creusé manuellement par un soudeur. Une reconstruction 3D est ensuite nécessaire du fait qu'il est difficile de travailler directement sur le maillage. Viennent ensuite les étapes suivantes : génération de la trajectoire, remplissage par le robot et validation du remplissage au regard de la géométrie et de la qualité matière. Un des inconvénients de ce processus est l'étape de reconstruction 3D. Cette étape est très couteuse en temps quelle que soit la méthode de reconstruction choisie (manuellement avec un logiciel CAO ou par traitement du maillage). C'est pourquoi notre étude propose de la supprimer.

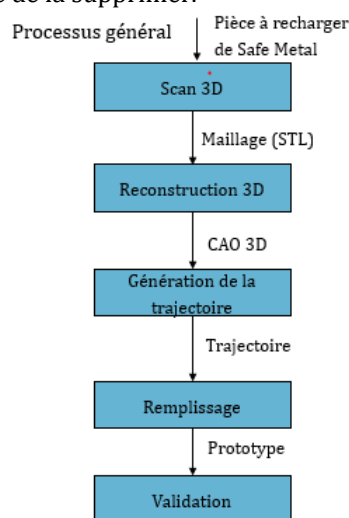


Figure 2 - Processus général de remplissage de pièce de moulage en acier

La question de recherche est alors la suivante :

« Quelle méthode de génération de trajectoire proposer à partir d'un maillage afin de recharger à l'aide d'un robot de soudage des pièces en acier affouillées ? »

3. ETAT DE L'ART

Une première étude bibliographique sur la méthode de génération de trajectoires pour remplir une forme à partir d'un maillage a été réalisée ; celle-ci n'apporte cependant pas de résultats intéressants pour notre contexte de travail pour lequel la forme à recharger est issue d'un scan 3D.

Une deuxième étude bibliographique s'est alors concentrée sur les stratégies de remplissage par soudage robotisé.

3.1. Stratégie de remplissage

Plusieurs stratégies de remplissage classique peuvent être envisagées pour fabriquer des pièces par le procédé WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), Figure 3:

balayage raster [5], zigzag [6,7], contour [8,9], spirale [10,11].

La stratégie raster est basée sur la projection dans une seule direction [5]. La génération de trajectoires en zigzag est une méthode qui remplit des géométries ligne par ligne le long d'une direction comme l'approche raster. La stratégie zigzag diffère de la stratégie raster par la combinaison de lignes parallèles séparées en une seule passe continue, ce qui réduit considérablement le nombre de passes de trajectoire d'outil [6,7]. 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 peut alors résoudre le problème de qualité géométrique en suivant le modèle géométrique des contours de la pièce [8, 9]. Toutefois, en décalant les contours, le schéma génère de nombreuses courbes fermées. Enfin, la génération de trajectoires en spirales est largement appliquée dans l'usinage à commande numérique, mais ne convient que pour certains modèles géométriques spéciaux dans le remplissage [10, 11].

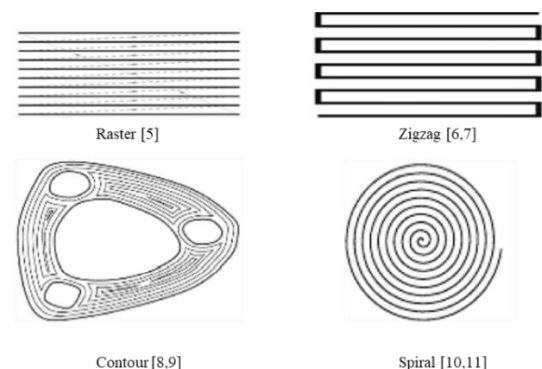


Figure 3 - Stratégie de remplissage

Plusieurs adaptations à ces stratégies classiques existent pour des formes plus complexes. La première adaptation de la stratégie en zigzag réalisée dans le WAAM a été proposée plusieurs années auparavant par Dwivedi et Kovacevic [12]. Cette stratégie a été dite continue (Figure 4a), consistant en des trajectoires en zigzag prévues pour laisser des espaces échelonnés entre les trajectoires, de telle sorte que les espaces soient séquentiellement comblés par une autre trajectoire en zigzag en sens inverse. Il est à noter que la stratégie continue peut-être adaptée à d'autres stratégies, par exemple en spirale, comme illustré sur la Figure 4b.

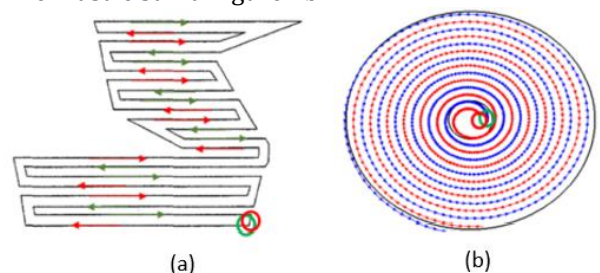


Figure 4 - Les adaptations aux les stratégies de remplissage classique ; (a) continue en zigzag ; (b) continue en spirale

3.2. Conclusion et démarche

Les travaux existants dans la littérature ne montrent pas de méthodes spécifiques de génération des trajectoires à partir d'un maillage. Une stratégie de remplissage dédiée à la réparation de pièce est proposée dans la section suivante.

Bien que différentes stratégies de remplissage soient étudiées dans la littérature, aucune étude actuelle ne permet de faire le choix entre ces stratégies afin de recharger notre pièce. Une étape de choix de la stratégie de remplissage doit alors être intégrée dans le processus de génération de trajectoire.

4. MODELE DE GENERATION DE LA TRAJECTOIRE ET VALIDATION

Dans cette section, un processus de génération de la trajectoire proposée est présenté. Ensuite, une étude de cas nous permet de tester et valider le processus proposé.

4.1. Processus de génération de la trajectoire

Les étapes du processus de génération de trajectoire que nous proposons sont présentées dans la Figure 5.

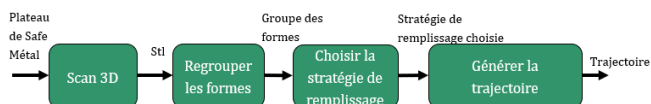


Figure 5 - Processus de génération de la trajectoire

4.1.1. Scan 3D

Plusieurs plaques comportant les formes usuelles à remplir sont proposées par Safe Metal (Figure 6).



Figure 6 - Plaques de Safe Metal

Dans cette étape, ces plaques sont scannées par un scan portable Go ! Scan3D pour obtenir un fichier CAO 3D au format STL (Figure 7). Ces fichiers nous permettent aussi de déduire les dimensions des formes (largeur, longueur et profondeur) à recharger.

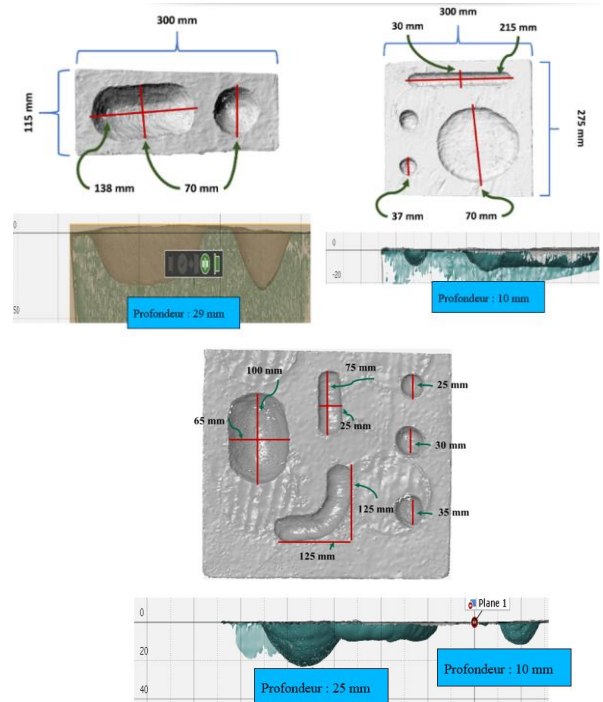


Figure 7 - Résultats du scan 3D

4.1.2. Regrouper les formes et Choisir la stratégie de remplissage

Dans cette étape, les formes sont regroupées afin de faciliter l'automatisation de la génération des trajectoires.

Les formes proposées par Safe Metal peuvent être regroupées en deux catégories au regard de l'expérience de soudage par Axive Additive et de l'expérience de génération de trajectoires par G-SCOP. Ce regroupement est effectué en fonction de la stratégie de remplissage associée : les formes linéaires (Figure 8) et Les formes circulaires (Figure 9) :



Figure 8 - Les formes linéaires

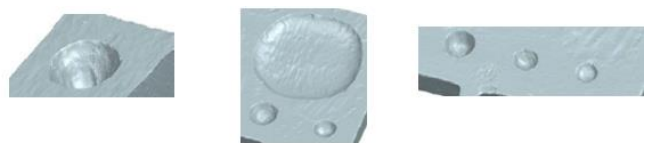


Figure 9 - Les formes circulaires

Dans cette étude, la stratégie de remplissage est choisie par l'étude bibliographique et l'expérience de Axive Additive. En effet, étant donné que la bibliographie ne nous donne pas d'éléments pour choisir la bonne stratégie de remplissage pour nos formes, il a été décidé d'opter pour les stratégies de remplissage en zigzag et raster pour les formes linéaires. Pour les formes circulaires, les stratégies en spirale ou par cercles concentriques (profils en parallèle et concentriques) sont utilisées.

4.1.3. Génération de la trajectoire

Un modèle de génération de la trajectoire a été développé avec l'outil Rhino – Grasshopper (Figure 10) qui inclut des étapes communes à tout type de remplissage et des étapes correspondant à la stratégie de remplissage choisie.

Cette étude est faite avec l'hypothèse que la torche est en position verticale lors de la fabrication.

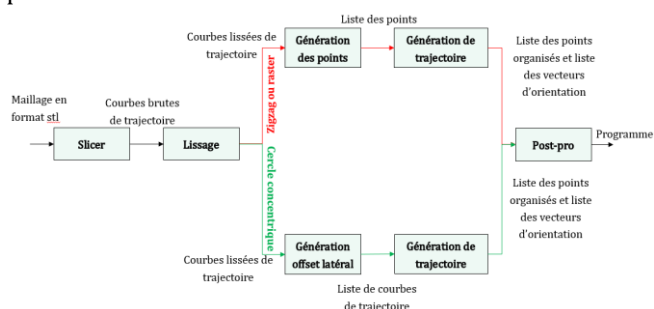


Figure 10 - Modèle de génération de trajectoire

- Deux étapes communes sont identifiées pour toutes les stratégies de remplissage : Slicer et Lissage

➤ **Slicer** : Comme tous les processus de fabrication additive, un tranchage avec des plans parallèles a été utilisé. Celui-ci est horizontal. La sortie de cette étape est l'obtention de courbes brute de trajectoires.

➤ **Lissage des contours** : l'objectif de cette étape est de lisser les courbes de trajectoire qu'on a obtenues à partir de l'étape précédente. Ce lissage est important du fait que l'on part du fichier du scan 3D et que les courbes de trajectoires ont toujours des passages qui génèrent des trajectoires difficiles à suivre par le robot (Figure 11). La courbe de trajectoires a été discrétisée par des points avec une distance constante (dc). Ces points sont utilisés comme des points de contrôle afin de créer une nouvelle courbe de trajectoires (Figure 12).

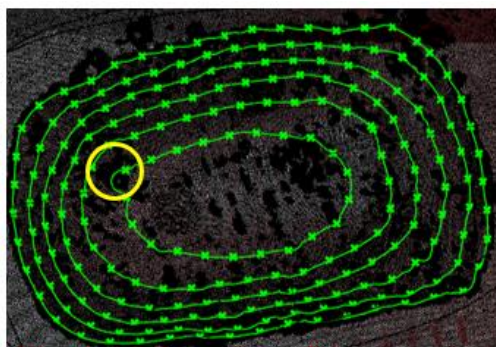


Figure 11 - Discrétisation de la courbe de trajectoires avec une distance constante

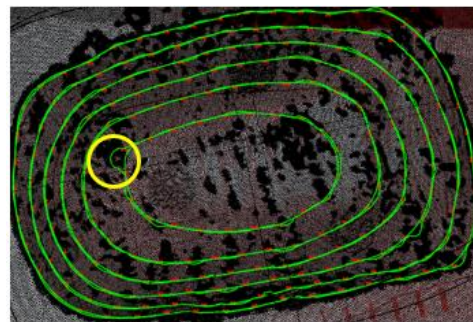


Figure 12 - Courbe de trajectoires après lissage

La qualité de la courbe après lissage dépend du paramètre de discrétisations (distance constante) (Figure 13). L'écart maximum entre la courbe brute et la courbe lissée est calculé. Cette valeur doit être inférieure de la moitié de la largeur du cordon de soudure pour éviter de créer des trous entre deux cordons de soudure. On la considère ainsi comme un critère de validation pour cette étape.

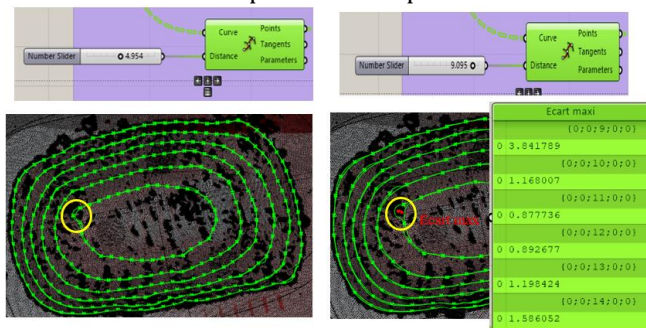


Figure 13 - Influence de la distance entre les points

- Les étapes pour la stratégie de remplissage en Zigzag ou Raster sont présentées en Figure 14:

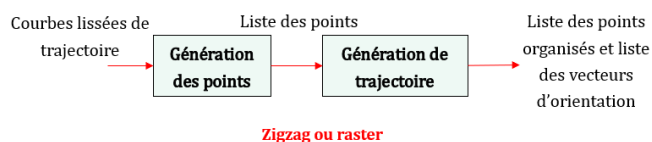


Figure 14 - Génération de la trajectoire pour la stratégie de remplissage par zigzag ou raster

➤ **Génération des points** : L'objectif de cette étape est de créer les points de la trajectoire à partir du contour de la couche considérée. Le but est de générer la trajectoire afin de remplir la partie intérieure de ce contour. Pour une couche, la direction des cordons de soudure est déterminée par le soudeur (cf ligne rouge sur la Figure 15). La forme de cette couche sera remplie par plusieurs cordons parallèles avec une distance déterminée par le soudeur selon les paramètres de la fabrication. L'objectif est de d'avoir un bon remplissage de la couche. Les points de départ et de fin de chaque cordon sont déterminés dans cette étape par l'intersection entre plusieurs plans parallèles avec la direction de la fabrication des cordons soudures (Figure 16a) et le contour. Les points sont présentés dans la Figure 16b.

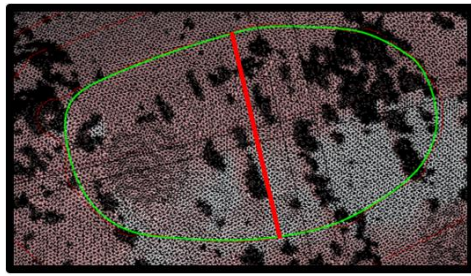


Figure 15 - Direction du cordon de soudure

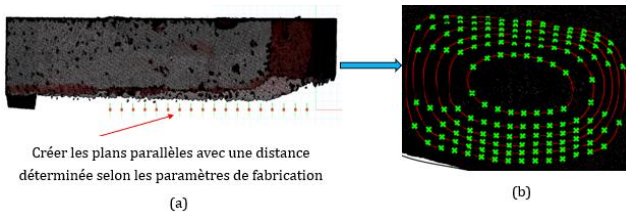


Figure 16 - Génération des points

➤ **Génération des trajectoires** : les différentes trajectoires sont générées en utilisant les points de trajectoire de l'étape précédente. Par exemple, le remplissage par zigzag (Figure 17), et le remplissage par raster (Figure 18).

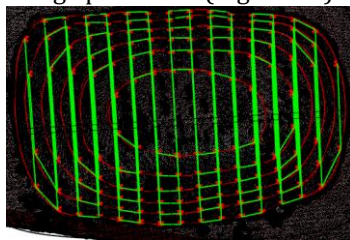


Figure 17 - Remplissage en zigzags

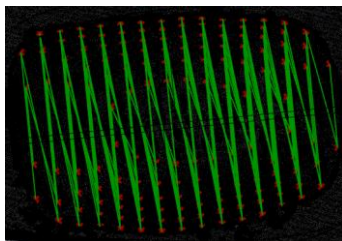


Figure 18 - Remplissage par raster

- Etapes pour la stratégie de remplissage en cercles concentriques (Figure 19) :

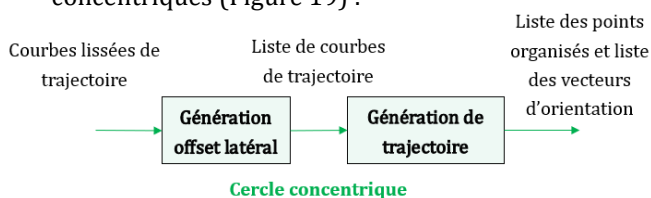


Figure 19 - Génération de la trajectoire avec la stratégie de remplissage par cercles concentriques

➤ **Génération des offsets latéraux** (Figure 20) : pour chaque couche de fabrication, un contour est généré par l'étape précédente. L'idée est ensuite de créer plusieurs courbes de trajectoires avec une distance égale à l'offset latéral comme indiqué en Figure 20b.

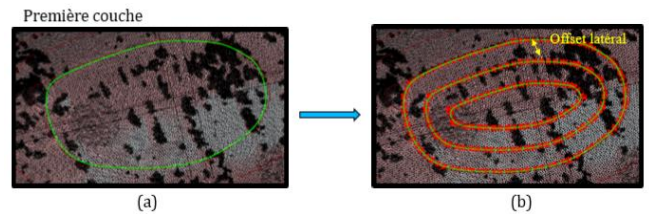


Figure 20 - Génération des offsets latéraux

➤ **Génération de trajectoires** : les points de la trajectoire sont obtenus en discrétisant les courbes issues de l'étape précédente. La trajectoire de remplissage pour cette couche est présentée en Figure 21. Selon la forme à remplir, le soudeur peut décider que la trajectoire démarre de l'intérieur vers l'extérieur ou inversement.

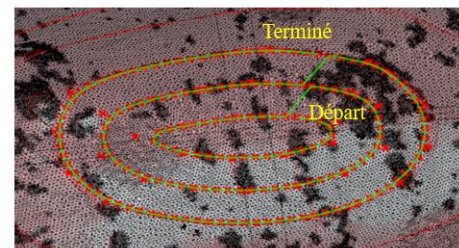


Figure 21 - Remplissage en cercles concentriques

- **Post-processeur** : il génère le programme correspondant au type de robot de soudure.

Ce modèle de génération de trajectoires est développé pour quelques stratégies de remplissage choisies en prenant en compte les recommandations des travaux existants, ainsi que les expériences de soudure par la fabrication additive de type WAAM.

Les stratégies de remplissage proposées dans cette étude ont été validées par les essais de remplissage de Axive Additive. Ceux-ci sont présentés dans la section suivante.

4.2. Expérimentation

Cette section montre l'application de nos stratégies de remplissage lors d'essais effectués par Axive Additive. Le premier essai de remplissage a permis d'obtenir une forme linéaire en utilisant le remplissage en zigzags (Figure 22).

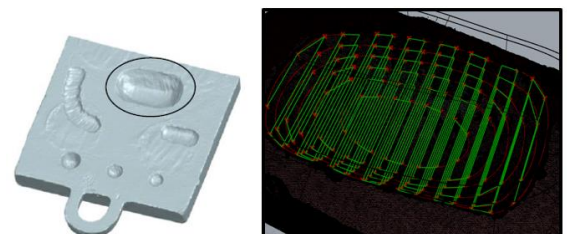


Figure 22 - Essai de remplissage en zigzags

Le résultat en Figure 23 montre une forme finale remplie avec 6 couches de fabrication.



Figure 23 - Résultat du premier essai

Un second essai a consisté en un remplissage d'une forme ronde et conique avec la stratégie de remplissage en cercles concentriques (Figure 24).

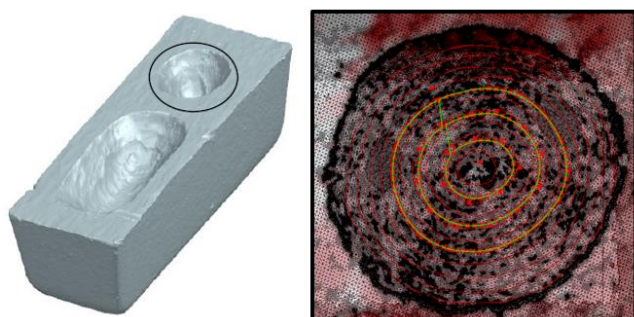


Figure 24 - Essai de remplissage en cercles concentriques

Le résultat du deuxième essai est montré en Figure 25. La forme a été remplie avec 8 couches de cordons par WAAM.



Figure 25 - Résultat du deuxième essai de remplissage

Par conséquent, une analyse visuelle rapide des géométries de ces deux prototypes nous permet de valider les stratégies de remplissage et les trajectoires générées par notre modèle.

Une analyse de la santé-matière des pièces obtenues doit être encore effectuée par la suite afin de vérifier les éventuels défauts intérieurs de ces composants et valider si l'on peut réparer des pièces de moulage en acier grâce à une automatisation du processus de réparation.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Dans ce travail de recherche, un premier modèle d'automatisation du processus de réparation de défauts

de pièces de moulage en acier par soudage a été développé.

Le résultat le plus important de cette étude est la proposition d'une méthode de génération de trajectoires de remplissage à partir du résultat de scan 3D (maillage). Ce modèle de génération de trajectoires peut être valable quel que soit le matériau. Deux types de stratégies de remplissage sont exploités et expérimentés dans ce papier : la stratégie de remplissage en zigzag et la stratégie en cercles concentriques.

En termes de perspectives, il serait bon d'adapter l'orientation de la torche au niveau de la géométrie afin d'augmenter la qualité du produit final. Aussi, une comparaison expérimentale entre les deux méthodes de génération de trajectoire proposée pour une même forme serait intéressante. De même, une étude sur les autres possibilités de stratégies de remplissage pourrait être développée par la suite. Enfin, l'optimisation du modèle de génération de trajectoires est aussi importante à développer afin de diminuer le temps de génération de trajectoire.

REMERCIEMENTS

Financé par la Région Auvergne Rhône Alpes dans le cadre du dispositif R&D Booster Auvergne-Rhône-Alpes.

RÉFÉRENCES

- [1] Y. Gurey, et coll., Waste Management, 2010, 30, 1705
- [2] D.G. Mahto Casting and Casting Processes, 2017, DOI: 10.2139/ssrn.2776565.
- [3] T. V. R. Rao, Metal Casting: Principles and Practice, 2007, New Age International, New Delhi
- [4] RAO, P. N. Manufacturing Technology Foundry, Forming, and Welding, Tata McGraw-Hill, New Delhi. 1999.
- [5] Dunlavey, M.R., Efficient polygon-filling algorithms for raster displays. ACM Transactions on Graphics (Tog), 2(4), pp.264-273, 1983.
- [6] Ferreira, R. P., Vilarinho, L. O., & Scotti, A. Development and implementation of a software for wire arc additive manufacturing preprocessing planning: trajectory planning and machine code generation. Welding in the World, 66(3), 455-470, 2022.
- [7] Rajan, V.T., Srinivasan, V. and Tarabanis, K.A., The optimal zigzag direction for filling a two-dimensional region. Rapid Prototyping Journal, 2001.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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
- [12] Dwivedi, R., & Kovacevic, R. Automated torch path planning using polygon subdivision for solid freeform fabrication based on welding. Journal of Manufacturing Systems, 23(4), 278-291, 2004.