

Stratégies de pilotage à grande vitesse en fusion laser sur lit de poudre dans le cadre du projet SOFIA

C. Tournier *, K. Ettaieb, K. Godineau, S. Lavernhe, Y. Quinsat

Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, LURPA, 91190 Gif-sur-Yvette, France

* e-mail : christophe.tournier@ens-paris-saclay.fr

1. INTRODUCTION

Le projet SOFIA (**S**olutions pour la **F**abrication Industrielle Additive métallique www.sofia-3d.fr) est un programme de recherche appliquée d'une durée de 6 ans (2016-2022). SOFIA a pour objectif d'améliorer les performances et la robustesse de la fabrication additive métallique sur lit de poudre, couvrant toute la chaîne de valeur, de l'élaboration des poudres à la fabrication des pièces finies en passant par le développement et l'exploitation des machines. Le consortium SOFIA est composé d'acteurs français majeurs dont 7 industriels et 9 laboratoires académiques. Doté d'un budget de plus de 50 M€, SOFIA est un PSPC (Projets de recherche et développement Structurants Pour la Compétitivité) soutenu financièrement par Bpifrance et par la région Auvergne-Rhône-Alpes. Le projet est labellisé par plusieurs pôles de compétitivité dont ViaMéca, Aerospace Valley, ASTech Paris Région, NAE et Mov'eo. Il vise ainsi au développement de briques technologiques permettant la fabrication de pièces robustes et de façon compétitive, en particulier pour répondre aux exigences de l'industrie aéronautique. Les travaux portent sur 4 axes principaux :

- Les poudres et matériaux métalliques
- L'amélioration de la performance et de la robustesse des machines
- Le développement d'outils numériques
- L'élargissement de la connaissance des risques HSE

Parmi les 7 lots du projet, nous nous focalisons dans cet article sur le lot n°2 et plus particulièrement sur la tâche 2.6 portant sur le développement de stratégies de pilotage à grande vitesse. En effet, les procédés de fabrication additive métallique et le procédé PBF-LB/M en particulier ont ceci de singulier qu'ils permettent de créer la géométrie et le matériau de la pièce en même temps. Le contrôle de la trajectoire de balayage laser et des paramètres du procédé est donc essentiel, c'est-à-dire

le contrôle de la position du spot laser dans le plan de travail et de la quantité d'énergie transférée à la matière. Aussi, parmi les tâches traitées nous avons choisi de présenter ici les travaux et résultats relatifs aux trois tâches suivantes :

1. Calibration optimale des chaînes optiques in-situ
2. Interpolation optimale des trajectoires par la CN
3. Génération des trajectoires

Ces trois tâches font partie de la chaîne numérique proposée sur la Figure 1 qui montre le besoin de disposer d'un jumeau numérique du moyen et du procédé s'appuyant sur des modèles afin de simuler la fabrication dans les phases amont pour améliorer et garantir la qualité interne et externe des pièces produites.

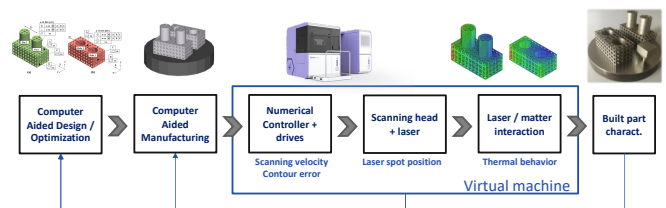


Figure 1 - Chaîne numérique

2. CALIBRATION OPTIMALE DES CHAINES OPTIQUES

Dans une machine PBF-LB/M, le système principal qui positionne le spot laser et distribue l'énergie sur le lit de poudre est la chaîne opto-mécanique et en particulier la tête de scanning (Figure 2). La calibration de ces systèmes est un processus itératif et long, n'intégrant que peu de modèles physiques. La relation entre la position du spot laser dans le plan de travail et la position des actionneurs, ici des galvanomètres, est obtenue par interpolation de tables de correspondance déterminées expérimentalement. En effet, la fréquence de pilotage des actionneurs à 100 kHz ne permet pas de calculer la transformation géométrique inverse en temps réel.

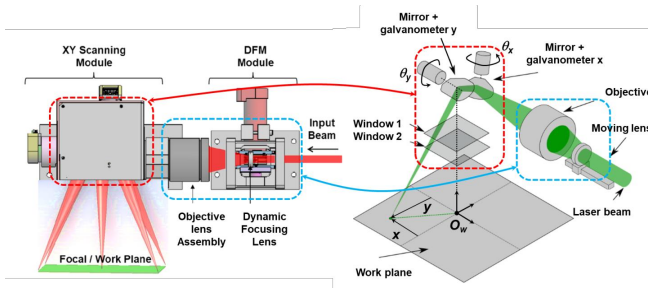


Figure 2 – Tête de scanning [1, 2]

Afin d'éviter les itérations successives de tirs laser pour raffiner ces tables de correspondance dans la phase d'étalonnage de chaque machine, un modèle géométrique a été développé s'appuyant sur 14 paramètres géométriques, 2 paramètres optiques et 30 défauts d'assemblage de la chaîne opto-mécanique [1, 2].

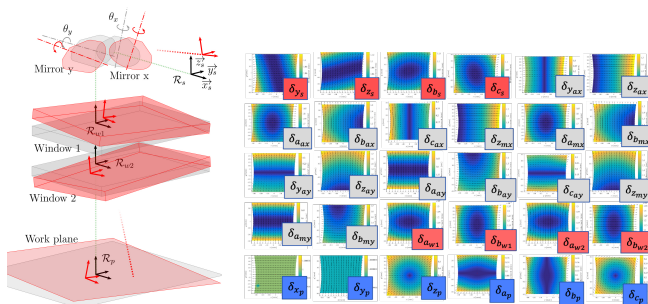


Figure 3 – Modèle géométrique avec défauts et base de défauts

Ce modèle est utilisé dans un processus d'identification des défauts pour obtenir une machine virtuelle représentative du système réel dont les étapes principales sont :

- Création d'une base de défauts (Figure 3)
- Calcul de l'écart entre position de consigne et mesure
- Obtention des valeurs des défauts par projection des écarts sur la base

Le modèle géométrique avec défauts ainsi développé est utilisé pour quantifier l'impact des défauts d'assemblage sur la position du spot laser, les compenser en les intégrant dans les tables de correspondance (Figure 4) et réduire le temps de calibration d'une machine de fabrication additive. Ainsi la méthode développée au LURPA et exploitée par AddUp permet de passer de deux jours de travail à une demi-journée pour assurer l'étalonnage.

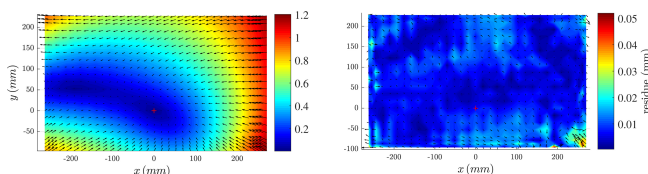


Figure 4 – Résidus entre les points mesurés et les modèles : nominal sans défaut (gauche), identifié avec défauts (droite)

L'inconvénient de cette approche est la méthode expérimentale pour générer et acquérir la position de points réels. Celle-ci s'appuie sur le gravage d'une plaque brunie dans la machine et la mesure de la position des

motifs à l'extérieur de la machine. Aussi les travaux développés dans [3] ont porté sur le développement d'une méthode de calibration in-situ des machines PBF-LB/M par vision au moyen d'une caméra haute résolution monochrome. Les étapes principales sont les suivantes :

- Calibration de la caméra et calcul de l'homographie à partir de quatre points appartenant au plateau
- Mesure d'environ 200 positions du spot laser par l'identification des coordonnées en pixel du centre spot dans l'image corrigée
- Identification du modèle géométrique avec défaut de la machine et calcul des tables de correspondance

Les résultats obtenus montrent que la méthode de mesure développée est appropriée pour la mesure in-situ avec une bonne exactitude. Après le processus de calibrage, les erreurs entre les positions générées par la machine identifiée et celles mesurées sont très faibles avec une erreur moyenne de 0,03 mm, et environ 80 % des positions présentent une erreur inférieure à 0,04 mm dans la zone de travail (Figure 5).

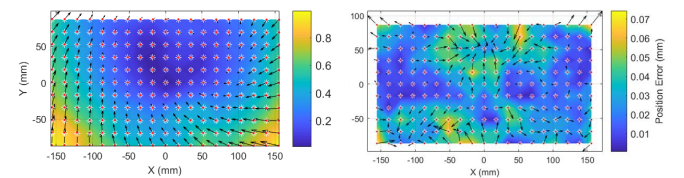


Figure 5 – Écarts absolus entre les points mesurés et prédits sans et avec défauts identifiés

3. INTERPOLATION OPTIMALE DES TRAJECTOIRES

En PBF_LB/M, la trajectoire effective du spot laser est rarement étudiée par rapport aux travaux sur le choix de la stratégie de balayage et de ses paramètres. Or, la trajectoire programmée en FAO est modifiée par la commande numérique (CN) de la machine afin de générer des consignes admissibles pour les actionneurs (galvanomètres). Cette modification génère localement des déviations sur la trajectoire et une diminution significative de la vitesse du spot laser [2, 4]. Afin d'identifier le comportement de la CN, un banc de test reproduisant une machine industrielle a été développé. Il permet d'acquérir les consignes envoyées aux actionneurs et leurs positions réelles à une fréquence de 100 kHz, ainsi que l'énergie déposée par le spot laser dans le plan de travail.

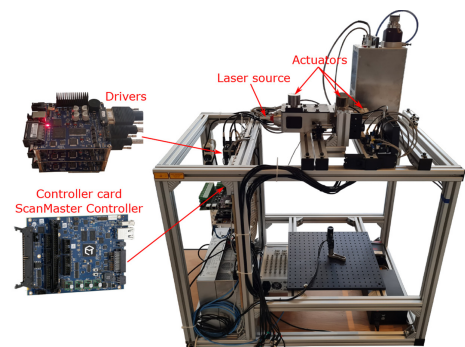


Figure 6 – Banc d'essai du couple CN / Tête de scanning

L'analyse de ces données montre que le traitement effectué par la CN est basé sur un filtrage numérique avec des filtres à réponse impulsionnelle finie. Tels qu'implémentés, ces filtres sont constants quelle que soit la condition de fabrication et génèrent alors des chutes de vitesse et une grande erreur de contour : plus de 100 μm à 2 m/s. Nous avons donc proposé différents types de filtres parmi lesquels les filtres adaptatifs en fonction de la trajectoire à exécuter et les filtres en chapeau pour répartir l'erreur de contour de part et d'autre de la trajectoire programmée.

4. GENERATION DES TRAJECTOIRES

4.1. Simulation thermique

La trajectoire de scanning ayant une influence majeure sur le comportement thermomécanique des pièces pendant la fabrication, nous avons proposé un modèle thermique tridimensionnel, de forme analytique et explicite, à l'échelle méso, permettant une évaluation efficace de l'effet de la trajectoire [5, 6]. La méthode « Flash » consiste à cumuler les effets locaux de conduction thermique du laser dans le matériau fusionné (Figure 8) afin de calculer la distribution du champ de température dans toute la couche à chaque pas de temps. Le modèle a été calibré et validé par comparaison avec les résultats thermiques obtenus par un logiciel EF ainsi que par des mesures expérimentales dans le cas du matériau Ti6Al4V. La mise en œuvre d'un tel modèle permet de contenir les temps de calcul et espace mémoire nécessaires pour simuler des pièces de taille industrielle et analyser l'effet des trajectoires et paramètres procédé (Figure 9). Les résultats de simulation soulignent l'influence des trajectoires de lasage sur le champ de température et la répartition des gradients thermiques au cours de la fabrication d'une couche. La connaissance du champ de température local et la forme explicite du modèle thermique permettent par la suite d'améliorer le pilotage du procédé, notamment par la mise en œuvre d'une modulation locale de la puissance laser.

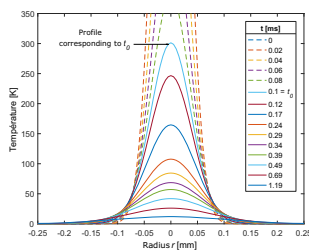


Figure 8 – Profils de température de surface simulés pour un flash

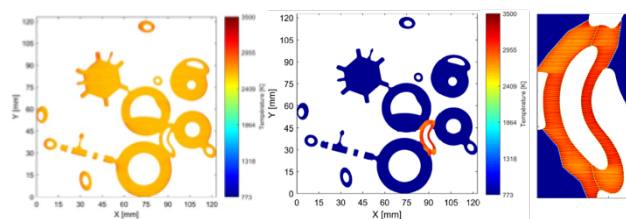


Figure 9 – Simulation thermique d'une couche complète (7 h, 32 Mo, 40 CPU) ; Simulation locale (10 min, 1 Mo, 40 CPU)

4.2. Trajectoires à modulation de puissance

L'optimisation et le contrôle des paramètres du procédé sont obligatoires pour améliorer la qualité des pièces produites. Pendant la fabrication, les paramètres du procédé sont généralement constants, quelle que soit la taille de la pièce ou de la couche construite. Le processus de fabrication peut ainsi conduire à un comportement thermique inhomogène et à des zones de surchauffe locales, affectant la qualité de la pièce. La méthode « Flash » a donc été exploitée pour moduler la puissance du laser en amont de la fabrication [6, 7]. L'approche suit deux étapes :

- Calcul de la température dite de préchauffage induite par conduction sur un point amont du trajet en cours
- Modulation de la puissance du laser pour atteindre la température désirée à ce point à l'interpolation suivante

Des investigations numériques sur plusieurs cas d'utilisation montrent l'efficacité de la méthode pour contrôler les zones surchauffées et pour homogénéiser la distribution de température simulée (Figure 10). La spécificité de ce modèle réside dans sa capacité à calculer directement la quantité d'énergie à fournir sans calculs itératifs. De plus, pour être au plus près de la technologie utilisée dans les machines, le comportement cinématique de la tête de balayage [4] et le temps de réponse du laser sont également intégrés dans le calcul.

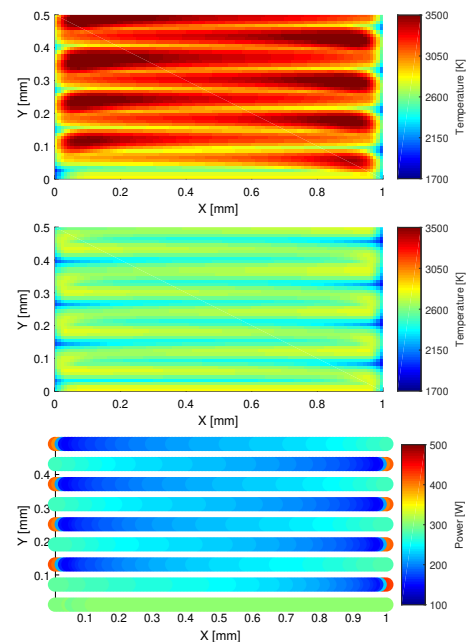


Figure 10 – carte de température pour une trajectoire zigzag discontinue, sans modulation de puissance (haut), avec modulation de puissance (milieu) et consigne de puissance modulée (bas).

4.3. Trajectoires de wobbling

Les trajectoires de balayage permettent de délivrer l'énergie au lit de poudre et ont un impact direct sur la distribution de la température. Cependant, les trajectoires de balayage actuellement utilisées sur les machines résultent principalement de procédés d'usinage et n'exploitent pas au mieux les performances des têtes de balayage. L'utilisation de trajectoires de wobbling,

initialement utilisées en soudage laser, a été étudiée pour améliorer la productivité du procédé [8]. Les modèles classiques de trajectoires de wobbling sont des courbes de Lissajous qui ne garantissent pas un dépôt d'énergie contrôlé. Aussi la méthode développée permet de simuler le dépôt d'énergie et de déterminer le motif de wobbling qui garantit le respect d'une densité d'énergie de surface donnée le long de la trajectoire (Figure 11).

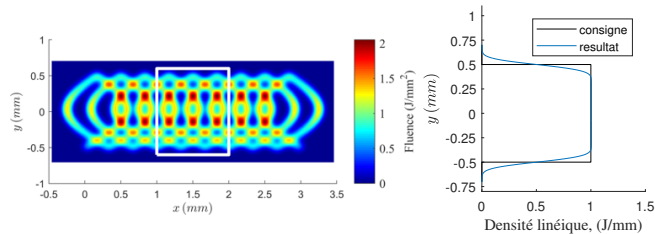


Figure 11 - Fluence surfacique d'une trajectoire de wobbling dont le motif est déduit du profil de fluence transverse imposé

4.4. Optimisation instationnaire des trajectoires

Dans la littérature, les trajectoires de scanning proposées sont principalement basées sur des motifs existants, dont la pertinence n'est pas liée à la pièce à construire. Nous avons donc proposé un algorithme d'optimisation pour déterminer la trajectoire sans restriction a priori, sans motif prédéterminé [9]. En tenant compte de la dépendance temporelle de la source, le temps de fabrication est minimisé sous deux contraintes :

- Fondre la structure requise (fusion dans le domaine, et pas à l'extérieur du domaine)
- Éviter toute surchauffe provoquant des déformations inhérentes

Les résultats montrent que l'optimisation tend vers des trajectoires semblables quelles que soient les conditions initiales (Figure 12) et indiquent des pistes prometteuses pour définir des motifs paramétriques dans le cas de stratégies en damier ou pour coupler l'optimisation topologique de la forme et de la trajectoire.

5. CONCLUSIONS

Les activités de recherche collaboratives menées au LURPA dans le cadre du projet SOFIA ont permis de produire un certain nombre de résultats scientifiques publiés dans des thèses, des revues internationales et des brevets. Ces travaux ont été valorisés industriellement en étant pour certains intégrés dans les machines FormUp350 et ont contribué au développement de la dernière génération de machines FormUp350 V2. Enfin ces résultats ouvrent diverses perspectives notamment dans le pilotage de machines innovantes qui font l'objet du projet ANR JCJC ORACLE (22-26) et de la chaire industrielle ANR SOLARIA (23-27).

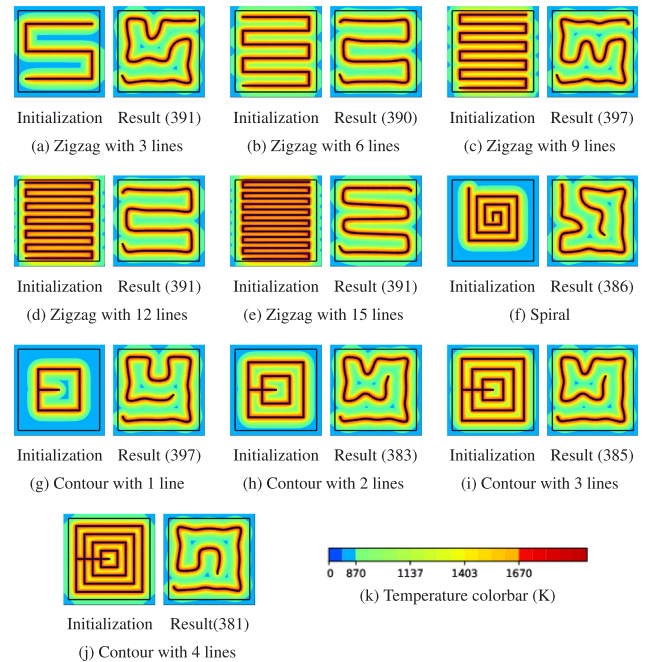


Figure 12 - Résultats d'optimisation instationnaire de trajectoires

RÉFÉRENCES

- [1] Godineau K., Lavernhe S., Tournier C. Calibration of galvanometric scan heads for additive manufacturing with machine assembly defects consideration. Additive Manufacturing, 26:250-257, 2019.
- [2] Godineau, K. Optimisation du pilotage de chaînes opto-mécaniques pour l'exécution de trajectoires en fabrication additive par fusion laser sur lit de poudre. PhD thesis, Université Paris-Saclay - ENS Paris-Saclay, 2019.
- [3] Le V.T., Quinsat Y. In situ calibration of galvanometric scanning head for laser powder bed fusion machines based on a vision system. Int J Adv Manuf Technol 111:1767-1783, 2020.
- [4] Godineau K., Lavernhe S., Tournier C. Influence of the CNC behaviour on the laser spot trajectory in LPBF process, EUSPEN Special Interest Group Meeting: Advancing Precision in Additive Manufacturing, St. Gallen (Switzerland) September 2021
- [5] Ettaieb K., Lavernhe S., Tournier C. A flash-based thermal simulation of scanning paths in LPBF additive manufacturing, Rapid Prototyping Journal, 27(4):720-734, 2021.
- [6] Ettaieb, K. Contribution à l'optimisation des stratégies de lasage en fabrication additive LPBF. PhD thesis, Université Paris-Saclay - ENS Paris-Saclay, 2019.
- [7] Ettaieb K., Godineau K., Lavernhe S., Tournier, C. Offline laser power modulation in LPBF additive manufacturing including kinematic and technological constraints. Rapid Prototyping Journal, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print., 2022.
- [8] Godineau K., Lavernhe S., Tournier C. Generation of wobbling scanning paths with prescribed energy fluence in L-PBF additive manufacturing process, Computer-Aided Design, Soumis.
- [9] Boissier M., Allaire G., Tournier C. Time Dependent Scanning Path Optimization for the Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Process. Computer-Aided Design, 142:103122, 2022.
- [10] Boissier M., Coupling structural optimization and trajectory optimization methods in additive manufacturing, PhD thesis, Institut Polytechnique de Paris - École Polytechnique, 2020.