



HAL
open science

Optimisation paramétrique de motifs de trajectoire de lasage en fabrication additive L-PBF

Mathis Riera, Eva Robillard, Christophe Tournier

► **To cite this version:**

Mathis Riera, Eva Robillard, Christophe Tournier. Optimisation paramétrique de motifs de trajectoire de lasage en fabrication additive L-PBF. Conference Manufacturing21, Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay [ENS Paris Saclay], Oct 2022, Gif Sur Yvette, France. hal-04011751

HAL Id: hal-04011751

<https://hal.science/hal-04011751>

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.



Optimisation paramétrique de motifs de trajectoires de lasage en fabrication additive L-PBF

Mathis RIERA^(a), Eva ROBILLARD^(b), Christophe TOURNIER^(c)

(a)(b) Université Paris Saclay, ENS Paris-Saclay, Département de Génie Mécanique, 4 Avenue des Sciences, Gif-sur-Yvette

(c) Université Paris Saclay, ENS Paris-Saclay, LURPA, 4 Avenue des Sciences, Gif-sur-Yvette

Mail : {mathis.riera ; eva.robillard ; christophe.tournier}@ens-paris-saclay.fr

Résumé : le procédé L-PBF (Laser Powder Bed Fusion) est parmi les procédés de fabrication additive métallique qui permettent l'obtention de pièces par ajout de matière couche par couche et pour lesquels la stratégie de lasage joue un rôle essentiel. Des travaux visant à optimiser la productivité de ce procédé ont mené à la proposition de nouveaux motifs de trajectoires de lasage à l'aide d'outils d'optimisation de formes pour compléter les stratégies conventionnelles telles que les stratégies zig-zag et contours parallèles. L'étude proposée a pour objectif de définir un modèle géométrique d'un motif en particulier, et d'optimiser ses paramètres d'un point de vue thermique pour un matériau donné. L'enjeu est d'obtenir un motif de longueur la plus courte, sans considération cinématique à ce stade, permettant de fusionner une zone délimitée, en minimisant les zones de surchauffe. Ce problème d'optimisation paramétrique non linéaire est résolu par un algorithme génétique. Couplé au modèle thermique analytique « Flash » précédemment développé, celui-ci permet d'ajuster les paramètres des motifs en s'appuyant sur des contraintes thermiques à l'intérieur et à l'extérieur du domaine considéré. L'étude a permis la mise en œuvre d'une telle optimisation sur le motif considéré et l'établissement d'un critère d'évaluation de leurs performances énergétiques par rapport aux stratégies conventionnelles. Une campagne expérimentale est en cours pour valider la conformité de la santé matière des pièces produites avec les nouvelles stratégies proposées.

Mots clés : Fabrication Additive, L-PBF, Optimisation Génétique, Stratégie de Lasage, Conduction thermique

1 Introduction

La fabrication additive (FA) est une technologie en plein essor dans divers secteurs industriels et en particulier la fusion laser sur lit de poudre métallique. Les procédés de FA ont ceci de particulier qu'ils permettent de créer le matériau en même temps que la géométrie de la pièce. Ce procédé a fait l'objet de nombreuses recherches ces dernières années, que ce soit d'un point de vue expérimental, théorique, ou numérique, pour mieux comprendre les phénomènes physiques mis en jeu et optimiser le procédé. L'amélioration de qualité des pièces produites du point de vue métallurgique, mécanique et géométrique passe par la maîtrise de la quantité d'énergie apportée par le laser à la poudre et aux échanges thermiques dans les différents milieux.

À ce titre, les paramètres du procédé et les trajectoires de lasage jouent en rôle prédominant (Ali, 2018) et influencent également la productivité des opérations de fabrication. Dans les machines, comme dans la littérature, les stratégies de lasage principalement utilisées pour le remplissage sont les stratégies en lignes parallèles, en zig-zag, en bande, en damiers et selon des contours parallèles (Jia, 2021). Les trajectoires en lignes parallèles et en zig-zag présentent des inconvénients comme l'accumulation de la chaleur aux extrémités des trajectoires et la génération de contraintes résiduelles voire de fissures (Jhabvala, 2010). Le problème vient de l'histoire thermique des zones affectées et notamment des surchauffes qui apparaissent aux extrémités des trajectoires zig-zag. Pour remédier à ces inconvénients, la stratégie en damiers permet de limiter les contraintes résiduelles, mais génère des zones de surchauffe importante qui provoquent le gonflement des surfaces pouvant amener à des problèmes de mise en couche. Aussi des stratégies à pas adaptatif ont été développées (Ettaieb, 2019) et des travaux portant sur l'optimisation des trajectoires de lasage et de la topologie des pièces ont conduit à découvrir différents motifs répétitifs (Boissier, 2020).

Le contexte de l'étude est celui de l'industrialisation de ces motifs et du motif « zigzag avec angle » en particulier en le comparant à des motifs conventionnels. Pour cela il est nécessaire de définir leur géométrie paramétrique de manière à pouvoir les adapter à des formes de pièces et des matériaux différents. Une phase d'optimisation paramétrique permet de déterminer les meilleurs paramètres géométriques, c'est-à-dire ceux qui produiront un motif le plus court possible en longueur ou en temps de parcours et qui permettront de fusionner toute une zone sans surchauffe. Dans le cas présent, l'optimisation est effectuée au moyen d'un algorithme génétique et s'appuie sur la méthode de simulation thermique analytique « FlashTherm » (Ettaieb, 2021) qui permet un temps de calcul de la fonction d'évaluation raisonnablement court.

Après avoir présenté les motifs qui font l'objet de l'étude et leur paramétrage, le processus d'optimisation des motifs est défini puis une campagne expérimentale numérique est menée avant de terminer par des conclusions et perspectives.

2 Définition paramétrique de la géométrie du motif étudié

Le motif retenu dans cette étude est un motif de type zig-zag continu comportant un trajet retour dont l'angle avec la direction horizontale est différent de l'angle droit. Ce type de motif est issu des travaux de (Ettaieb, 2019) et permettrait d'éviter les accumulations de chaleur dans les zones de changement de direction par rapport à un motif zigzag continu

conventionnel. Les paramétrages du motif proposé et des motifs conventionnels considérés sont présentés sur la figure 1. Ainsi, trois paramètres géométriques sont considérés, les deux longueurs L_1 , L_2 et l'angle θ . Pour chacun des motifs, la longueur L de la trajectoire (Eq.1) et la surface S_Σ du motif (Eq.2) sont évaluées à des fins de comparaisons des quantités d'énergie déposée après optimisation des motifs.

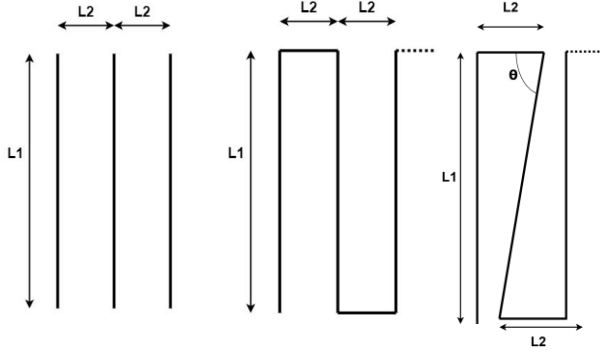


Figure 1 : les trois motifs considérés

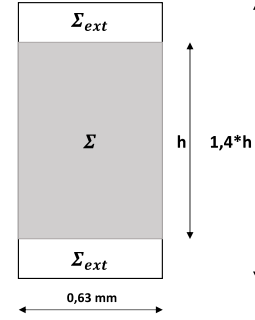


Figure 2 : domaines considérés

Longueur de la trajectoire L :

$$L = L_1 + 2L_2 + \frac{L_1}{\sin(\theta)} \quad (1)$$

Surface du domaine S_Σ :

$$S_\Sigma = h \cdot \left(2L_2 - \frac{L_1}{\tan(\theta)} \right) \quad (2)$$

Avec h la hauteur du domaine Σ .

3 Problème d'optimisation

3.1 Définition du problème

Le problème considéré est celui du lasage d'un domaine Σ (2D) donné et plus particulièrement de minimiser le temps de fabrication, ici ramené à la longueur de la trajectoire L , tout en respectant (minimisant) trois contraintes thermiques (Boissier, 2020). Les domaines Σ et Σ_{ext} sont discrétisés avec n le nombre de points du domaine intérieur Σ , m le nombre de points du domaine extérieur Σ_{ext} , et donc $n+m$ le nombre total de points. On note T_i la température au point i considéré, T_f la température de fusion du matériau et T_c la température critique à ne pas dépasser. Les sommes sont effectuées sur les $n+m$ points du domaine discrétisé. On note par ailleurs $[\cdot]^+$ la partie positive. Le poids associé à chaque contrainte peut être ajusté par la valeur des réels a , b et c . On considère également les réels positifs α , β , γ .

Les contraintes thermiques sont définies telles que :

- Fusion à l'intérieur du domaine Σ : la moyenne sur le domaine des écarts à la température de fusion (T_f) des points n'ayant pas dépassé cette température à

l'intérieur du domaine (Eq.3). Cette contrainte permet d'assurer que toute la couche de poudre du domaine a été fusionnée.

$$C_1 = a \frac{1}{n + m} \left(\sum_{i=1, i \in \Sigma}^n ([T_f - T_i]^+)^{\alpha} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (3)$$

- Surfusion à l'intérieur du domaine Σ : la moyenne sur le domaine des écarts à la température de surchauffe (T_c) des points ayant dépassé cette température à l'intérieur du domaine (Eq.4). Cette contrainte permet de minimiser les zones de surchauffe à l'intérieur du domaine.

$$C_2 = b \frac{1}{n + m} \left(\sum_{i=1, i \in \Sigma}^n ([T_i - T_c]^+)^{\beta} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (4)$$

- Fusion dans le domaine extérieur Σ_{ext} (figure 2) : la moyenne sur le domaine extérieur des écarts à la température de fusion (T_f) des points ayant dépassé cette température dans le domaine Σ_{ext} (Eq.5). Cette contrainte permet d'éviter de fusionner à l'extérieur du domaine Σ .

$$C_3 = c \frac{1}{n + m} \left(\sum_{i=1, i \in \Sigma_{ext}}^m ([T_i - T_f]^+)^{\gamma} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (5)$$

3.2 Choix de la formulation du problème d'optimisation

Plusieurs approches sont possibles pour formuler le problème d'optimisation et déterminer les paramètres géométriques des motifs. La première consisterait à minimiser la longueur de la trajectoire sous contraintes thermiques. Dans cette approche il faudrait idéalement annuler les contraintes, tout au moins les imposer inférieures à un certain seuil, au moyen d'une contrainte non linéaire. Cette approche augmente grandement le temps de calcul, et de plus, rien n'assure la possibilité du respect des contraintes pour une trajectoire paramétrée donnée. Cette approche ne sera pas développée dans cet article. Une seconde approche est celle d'une minimisation multi objectifs de la longueur et des contraintes thermiques. Il est alors possible d'obtenir un front de Pareto donnant des individus minimisant un critère, pour une valeur donnée de l'autre. Cette approche qui nécessite des temps de calcul plus longs n'est pas non plus développée dans cet article. La troisième et dernière approche consiste à minimiser la somme pondérée des contraintes thermiques sans explicitement minimiser la longueur de trajectoire. Il s'agit de l'approche retenue ici, car c'est implicitement la solution qui minimise l'apport d'énergie pour fusionner le domaine considéré, donc la longueur de la trajectoire, tout paramètre égal par ailleurs. Dans le cas présent, la fonctionnelle F à minimiser s'exprime de la manière suivante (Eq.6) :

$$F = \frac{1}{n+m} \left(2 \cdot \left(\sum_{i \in \Sigma} ([T_f - T_i]^+)^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\sum_{i \in \Sigma} ([T_i - T_c]^+)^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\sum_{i \in \Sigma_{ext}} ([T_i - T_f]^+)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (6)$$

En choisissant $a = 2$ et $b = c = 1$, on donne davantage d'importance à la contrainte de fusion dans le domaine Σ . Par ailleurs, on favorise les zones locales dans lesquelles les contraintes sont les moins respectées en choisissant $\alpha = \beta = \gamma = 2$ plutôt que des valeurs plus élevées de ces paramètres qui favoriseraient la diminution des seules valeurs maximales.

3.3 Méthode de résolution du problème d'optimisation

Le problème d'optimisation est résolu au moyen d'un algorithme génétique. Cette technique d'optimisation ne nécessite pas d'information sur les dérivées et permet d'optimiser toutes sortes de problèmes, à la fois les fonctions discrètes, les problèmes multi-objectifs mais également les fonctions continues. Ses avantages par rapport aux autres méthodes incluent, entre autres, sa capacité à éviter de rester bloqué dans un minimum local ainsi que l'utilisation d'une sélection probabiliste et non déterministe. Cette optimisation est mise en œuvre dans Matlab grâce à la Toolbox Matlab « Genetic Algorithm », abrégée par « ga ». Cet outil permet la construction de l'algorithme par le choix et le réglage d'un ensemble de paramètres, qualifiés d'options, qui peuvent être réglées manuellement. Parmi celles-ci, seules trois principales options ont été retenues :

- Le nombre de générations N_g
- Le nombre d'individus par génération N_p
- La proportion d'individus de la nouvelle génération obtenue par croisement (« CrossoverFraction »), complémentaire à la proportion d'individus conservés de la dernière génération (« EliteCount ») et à la proportion des individus obtenus par mutation. Ce mécanisme est décrit figure 3.

Plusieurs essais menés dans le but de trouver la valeur optimale de tous ces paramètres dans des cas précis n'ont pas démontré de résultats concluants. À nombre de générations et d'individus croissants s'associe une solution finale à score la plupart du temps inférieur, mais à plus grand coût temporel. Ainsi dans les optimisations de l'étude le paramètre « CrossoverFraction » a été fixé à 0,7, le nombre de générations à 50 et le nombre d'individus à 50 par défaut. Le taux de mutation est fixé à 0,25 sachant que la proportion de population conservée « EliteCount » est de 5%.

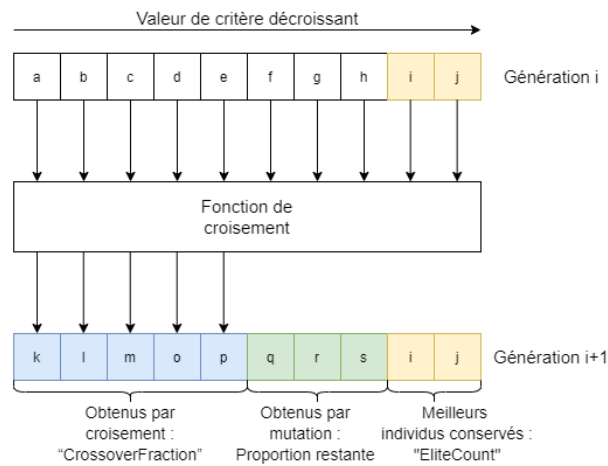


Figure 3 : Construction des différentes générations d'individus

3.4 Processus intégré d'optimisation

Le point de départ du processus est le paramétrage d'un motif précis par un certain nombre de variables, dans notre cas des angles et/ou des longueurs. La génération de la population initiale permet alors de choisir des valeurs numériques associées à ces variables dans le respect des options d'optimisation. Une trajectoire est alors construite par assemblage de différents segments de trajectoire avec leurs propres paramètres. Il est à noter que ces paramètres peuvent être potentiellement soumis à des contraintes, dans notre cas des bornes. Pour mener à bien l'optimisation, ces motifs de trajectoire sont à intégrer dans la simulation thermique pour obtenir les cartes de températures associées. Le programme de simulation « Flash » (Ettaieb, 2021) nécessite en entrée les points de la trajectoire de scanning. Celle-ci est discrétisée et définie à pas de temps constant entre chaque point. La simulation thermique permet d'obtenir le champ de température à tout instant et en tout point de l'espace 2D défini par le domaine Σ et le domaine externe Σ_{ext} . Ces valeurs de température peuvent donc être exploitées pour le calcul des contraintes thermiques et donc de la fonction objectif. Une nouvelle itération de la méthode d'optimisation est possible par la constitution de la génération suivante, à partir des mêmes options d'optimisation et pour ensuite suivre la même démarche. De cette méthode d'optimisation est obtenu le meilleur vecteur de paramètres qui minimise la fonction objectif. Finalement avant d'aborder sa mise en œuvre, il est important de rappeler que l'algorithme d'optimisation génétique ne permet pas d'assurer, même après un nombre important de générations, que la solution trouvée soit la meilleure.

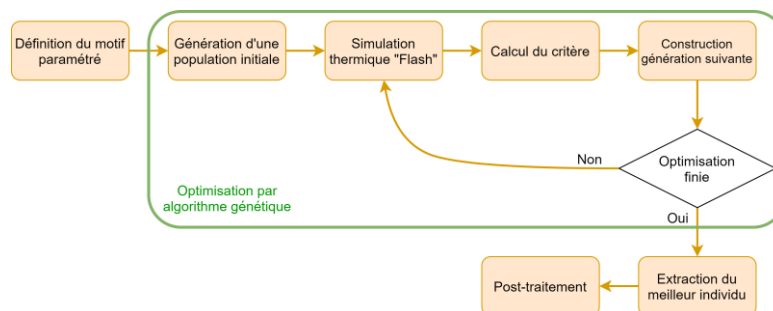


Figure 4 : synoptique du processus d'optimisation

4 Campagne expérimentale

On cherche à optimiser le motif « zigzag avec angle », qui a pour objectif de tirer profit du préchauffage induit par la passe précédente. Ce motif sera comparé avec les deux stratégies conventionnelles que sont la stratégie zigzag continu pour laquelle le laser reste allumé le long du segment qui relie deux passes successives et la stratégie zigzag simple pour laquelle le laser est éteint et effectue un saut d'une passe à l'autre. Cette dernière stratégie sera la référence, car la plus utilisée sur les machines industrielles, notamment dans les stratégies en bandes ou en damiers.

Afin de pouvoir comparer ces motifs, outre le score réalisé pour la fonction objectif F , l'énergie surfacique E_{Σ} est calculée à partir de la puissance du laser P , de la vitesse V , de la longueur L de la trajectoire et de la surface associée au motif S_{Σ} (Eq.7). Ainsi ce paramètre est proportionnel à la longueur de la trajectoire quand le laser est actif puisque la puissance et la vitesse de parcours sont considérées constantes et nominales. Autrement dit, c'est le ratio entre la longueur de la trajectoire et la surface du domaine considéré. À plus long terme, ce paramètre permettrait d'inclure les variations de vitesse liées aux limites cinématiques des têtes de scanning.

$$E_{\Sigma} = \frac{P}{V} \cdot \frac{L}{S_{\Sigma}} \quad (7)$$

Cependant, ce critère ne tient pas compte des sauts entre passes pour la stratégie zigzag simple. L'expérience montre qu'un saut de trajectoire n'est pas exécuté par les actionneurs à la vitesse programmée (6m/s), mais plutôt à une vitesse proche de la vitesse de scanning (1m/s) (Godineau 2019). Aussi, à titre de comparaison, le saut entre deux passes sera considéré de deux manières différentes. Dans le premier cas, il est effectué à la vitesse de scanning et intégré dans la longueur de la trajectoire de marquage, en conséquence de quoi, les longueurs des trajectoires et surface des domaines sont les mêmes pour les deux stratégies conventionnelles (Eq.7). Dans le second cas, le saut est considéré comme effectué à vitesse infinie donc à longueur nulle.

Les différents motifs sont optimisés pour des hauteurs h de domaine variants de 0,2 mm à 1 mm, par pas de 0,05 mm. Les domaines de variation des différents paramètres sont les suivants : $0,01 \leq L_1(mm) \leq h$; $0,01 \leq L_2(mm) \leq 0,15$; $70 \leq \theta (^{\circ}) \leq 100$.

D'un point de vue théorique, on s'attend à ce que plus la hauteur h du domaine augmente, plus les niveaux d'énergie surfacique des trois stratégies convergent vers la même valeur, celle de la stratégie zigzag simple. En effet, d'une part la longueur cumulée des portions de trajectoires horizontales devient plus petite par rapport à la longueur cumulée des trajectoires verticales. D'autre part l'angle θ de repli des trajectoires tend vers 90° au fur et à mesure que la hauteur augmente, convergeant ainsi vers un motif conventionnel. Dans ce dernier cas, le préchauffage généré par la passe précédente tend aussi à diminuer.

Le domaine total considéré est d'une largeur choisie telle que la trajectoire la couvrant contienne plusieurs fois le motif répété. Comme le voisinage spatial d'influence thermique du passage du laser peut être plus grand qu'un motif, la simulation de multiples motifs permet de mieux représenter une situation réelle d'impression où la zone à fusionner serait large de plusieurs millimètres.

Les simulations sont effectuées pour un alliage de Titane (Ti6Al4V) selon les paramètres décrits dans le tableau 1. La réalisation d'une optimisation nécessite $N_g.N_p$ évaluations de la fonction objectif et dure de quelques minutes à quelques heures selon la hauteur h de la zone à fusionner.

Tableau 1 : paramètre du procédé, du matériau et de la simulation

Puissance : $P = 300$ W	Conductivité thermique : $\lambda = 15$ W m ⁻¹ K ⁻¹
Rayon du fuseau laser : $R = 5 \cdot 10^{-5}$ m	Chaleur spécifique : $C = 800$ J Kg ⁻¹ K ⁻¹
Vitesse de déplacement $V = 1$ m s ⁻¹	Densité : $\rho = 4420$ Kg m ⁻³
Vitesse de saut $V = 6$ m s ⁻¹	Coefficient d'absorption : $A = 30$ %
Temp. de préchauffage : $T_0 = 373$ K	
Pas spatial : 10^{-6} m	Pas temporel : 10^{-6} s

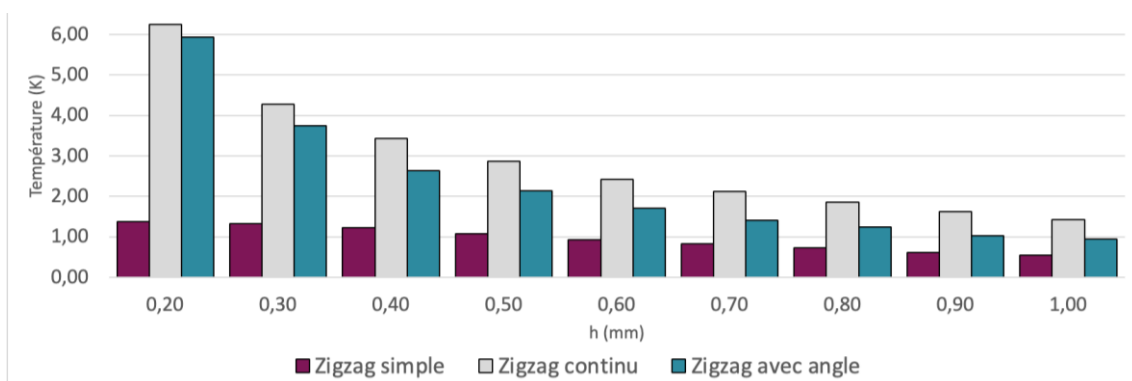


Figure 5 : valeurs de la fonction objectif

Concernant tout d'abord l'évolution de la fonction objectif (figure 5), on observe que la stratégie zigzag simple est la plus performante quelle que soit la taille du domaine. Pour les deux autres stratégies, la fonction objectif est un peu inférieure pour la stratégie en zigzag avec angle et elle diminue quand la taille du motif augmente. Cela peut s'expliquer par le fait que même pour de petits motifs, la trajectoire doit comporter au moins deux portions horizontales et quatre coins qui sont plutôt des zones de surfusion.

Concernant la géométrie des motifs, on peut noter que la stratégie en zigzag avec angle ne converge jamais vers la stratégie zigzag continue, c'est-à-dire vers un angle de 90°, sauf pour le tout premier cas quand $h=0,15$ mm (figure 6). D'un point de vue thermique, cette stratégie avec angle apparaît donc plus performante que la stratégie zigzag continue.

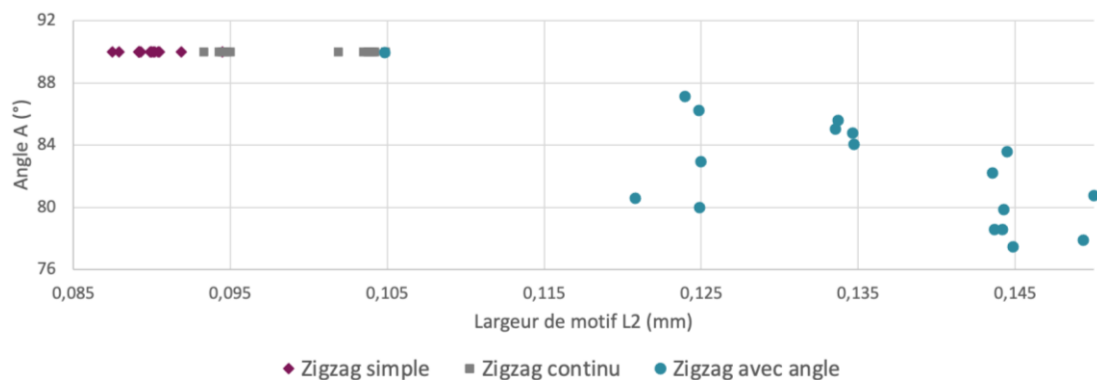


Figure 6 : paramètres des motifs

Pour la stratégie zigzag avec angle, on remarque que l'algorithme a généré des clusters de motifs autour de certaines valeurs de L_2 (0,125, 0,135 et 0,145). Enfin les valeurs de L_2 sont plus faibles d'environ 10% pour la stratégie zigzag simple ($L_{2\text{moy}} = 0,089$ contre $L_{2\text{moy}} = 0,099$), ce qui s'explique par l'absence de trajectoires de marquage horizontales qui apportent de l'énergie. D'un point de vue productivité, la distance entre passes est donc plus faible ce qui suggère une baisse de productivité à modérer en fonction des temps effectifs de saut inter passes en zigzag simple. Un exemple de résultat d'optimisation des trajectoires est illustré à la figure 7.

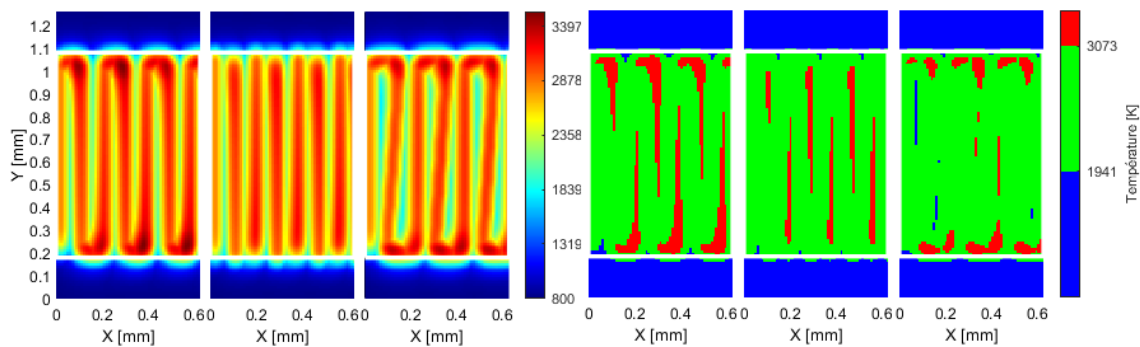


Figure 7 : exemple de motifs pour $h=0,9$ pour chacune des 3 stratégies

En supposant que les motifs comparés fusionnent correctement le domaine intérieur, on considère qu'un motif à énergie surfacique plus faible est meilleur, car il dépose moins d'énergie excessive, il est donc plus efficace. L'évolution des différentes énergies surfaciques E_{Σ} obtenues est présentée figure 8. On observe des variations de l'énergie surfacique selon la hauteur du motif. En particulier, les trois stratégies de lasage déposent davantage d'énergie pour les plus petits motifs, en adéquation avec les comportements observés figure 5 pour les contraintes thermiques. La densité d'énergie déposée avec la stratégie zigzag simple à vitesse de saut infinie (« zigzag simple G0 ») est plutôt régulière contrairement aux deux autres. La dispersion des valeurs obtenues pour les autres stratégies est probablement liée à l'optimisation génétique. Cependant, la valeur moyenne de l'énergie surfacique est approximativement la même en moyenne pour les trois stratégies, soit environ $0,39 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$. On voit également que dans le cas où la vitesse de saut est égale à la vitesse de scanning (« zigzag simple G1 »), les performances de la stratégie s'effondrent en termes de productivité puisque l'énergie surfacique est plus grande, avec un ratio L/S_{Σ} défavorable.

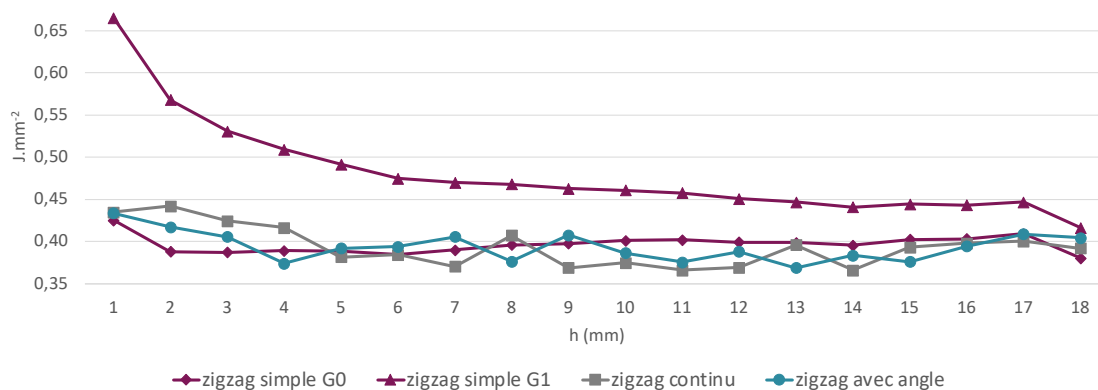


Figure 8 : évolution de l'énergie surfacique

Comme évoqué précédemment, la réalité se situe quelque part entre les deux configurations considérées pour le zigzag simple. Enfin le motif zigzag avec angle est comparable au motif zigzag continu en termes de ratio L/S_{Σ} .

5 Conclusions et perspectives

L'objectif de cet article était d'étudier une évolution géométrique de la stratégie zigzag par l'introduction d'un angle de repli des trajectoires créant ainsi un motif inédit. Cette modification est motivée par la présence de zones de surchauffe aux extrémités des trajectoires et la volonté d'exploiter le préchauffage pour écarter davantage les trajectoires. Les résultats d'optimisation paramétrique montrent que la valeur de l'angle ne converge jamais vers 90° sous contraintes thermiques. Ainsi la trajectoire zigzag continue conventionnelle n'est pas le meilleur motif de ce point de vue. Cependant, d'un point de vue productivité, les stratégies zigzag continue et zigzag avec angle font jeu égal. De son côté la stratégie zigzag simple est la plus performante en termes de comportement thermique pour les domaines étudiés. Cependant, la productivité de cette stratégie n'est sans doute pas la meilleure et une étude incluant le comportement cinématique des têtes de scanning permettra d'en savoir plus. Enfin, une analyse expérimentale des caractéristiques des pièces produites sur une machine FormUp 350 avec ces différentes stratégies est en cours, à la fois en termes de porosité et de topographie de surface.

Références

- H. Ali, H. Ghadbeigi, K. Mumtaz., (2018) *Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V*, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 712, pp. 175-187, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.103>
- M. Boissier (2020), *Coupling structural optimization and trajectory optimization methods in additive manufacturing*, Thèse de doctorat de l'Institut Polytechnique de Paris. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03106260v1>
- M. Boissier, G. Allaire, and C. Tournier, (2022) *Time dependent scanning path optimization for the powder bed fusion additive manufacturing process*, *Computer-Aided Design*, vol 142, 103122 <https://doi.org/10.1016/j.cad.2021.103122>
- K. Ettaieb (2019) *Contribution à l'optimisation des stratégies de lasage en fabrication additive LPBF*, Thèse de doctorat de l'ENS Cachan.
- K. Ettaieb, S. Lavernhe, C. Tournier (2021) *A flash based thermal simulation of scanning paths in LPBF additive manufacturing*, *Rapid Prototyping Journal*, vol 27, pp.720-734 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03196247>
- K. Godineau (2019) *Optimisation du pilotage de chaînes opto-mécaniques pour l'exécution de trajectoires en fabrication additive par fusion laser sur lit de poudre*, Thèse de doctorat de l'ENS Cachan.
- H. Jia, H. Sun, H. Wang, Y. Wu, and H. Wang, (2021) *Scanning strategy in selective laser melting (slm): a review*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol 113, pp.2413-2435. [/https://doi.org/10.1007/s00170-021-06810-3](https://doi.org/10.1007/s00170-021-06810-3).
- MathWorks: <https://www.mathworks.com/help/gads/genetic-algorithm.html>