



HAL
open science

Simulation thermique des trajectoires de lasage basée sur des flashes en fabrication additive LPBF

Kamel Ettaieb, Sylvain Lavernhe, Christophe Tournier

► **To cite this version:**

Kamel Ettaieb, Sylvain Lavernhe, Christophe Tournier. Simulation thermique des trajectoires de lasage basée sur des flashes en fabrication additive LPBF. Conférence Manufacturing'21, Jun 2021, Angers (en distanciel.), France. hal-03268306

HAL Id: hal-03268306

<https://hal.science/hal-03268306v1>

Submitted on 23 Jun 2021

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.



Simulation thermique des trajectoires de lasage basée sur des flashes en fabrication additive LPBF

Kamel ETTAIEB^{(a)*}, Sylvain LAVERNHE^(b), Christophe TOURNIER^(b)

(a) Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, Institut Farman (FR3311), LURPA, 91190 Gif-sur-Yvette

(b) Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, LURPA, 91190 Gif-sur-Yvette

* Correspondant : kamel.ettaieb@ens-paris-saclay.fr

Résumé : la fusion laser sélective sur lit de poudre est parmi les procédés de fabrication additive métallique qui permettent l'obtention des pièces par ajout de matière couche par couche à partir d'une maquette numérique. L'enjeu principal de ce procédé consiste à maîtriser les contraintes résiduelles dans les pièces produites. Dans ce cadre, la trajectoire de lasage influe sur le comportement thermomécanique de la pièce au cours de la fabrication. Il est donc nécessaire de valider la génération des trajectoires au regard de l'aspect thermique induit par ce procédé. Dans cette étude, une méthode analytique a été exploitée pour développer un modèle qui permet d'analyser le comportement thermique pour une trajectoire donnée. L'approche proposée consiste, dans un premier temps, à imposer des excitations impulsionnelles de température suivant la trajectoire, puis dans un second temps à sommer les effets de conduction thermique dans le matériau afin de calculer la distribution du champ de température sur toute la surface à chaque pas de temps. Cette méthode a été ensuite utilisée pour tester différents types de trajectoires. Les résultats de simulation ont confirmé l'influence des trajectoires sur le champ de température maximale et la répartition des gradients thermiques au cours de la fabrication d'une couche. Ceci a mis en évidence l'importance d'optimiser les trajectoires de lasage pour homogénéiser la répartition thermique et réduire les contraintes résiduelles.

Mots clés : Fabrication additive, fusion laser sur lit de poudre, trajectoire de lasage, modélisation thermique, gradients thermiques.

1 Introduction

La fusion laser sélective sur lit de poudre (LPBF) est une technique de fabrication additive métallique qui utilise un laser de forte puissance pour faire fondre la poudre selon les trajectoires de lasage. Au cours de ce procédé, les températures atteintes, dans des zones locales, sont susceptibles de générer des gradients thermiques importants. Ces gradients conduisent à leur tour à l'apparition des contraintes résiduelles qui provoquent des déformations, ainsi que des micro et macro fissures suite au refroidissement des pièces (Kempen, 2013).

Dans ce contexte, les trajectoires de lasage jouent un rôle fondamental dans la fusion et la solidification du matériau. Dans la littérature, plusieurs stratégies de remplissage ont été proposées parmi lesquelles la stratégie en zigzag qui consiste à balayer le modèle, ligne par ligne, avec un sens de parcours alterné en allers et retours. Celle-ci présente des inconvénients comme l'accumulation de chaleur au niveau des extrémités où se situent les inversions du mouvement (Jhabvala, 2010). La stratégie en contours est une approche qui a démontré son efficacité pour améliorer la précision géométrique des pièces et homogénéiser la distribution des contraintes (Fuh, 2002). L'approche par remplissage alternatif est basée sur l'idée de changer la direction de balayage après l'impression d'une couche (Huang, 2005). Jhabvala et al. (Jhabvala, 2010) ont développé la trajectoire sectorielle dont le principe consiste à diviser la surface en petits secteurs. Chaque zone est balayée avec la stratégie des lignes parallèles dans des directions alternées. Cette méthode modifie la dynamique thermique et limite les inhomogénéités du champ de température. Des secteurs en nid d'abeille ont également été exploités (Chantarapanich, 2014) ainsi que des trajectoires fractales. L'inconvénient principal de ces approches est le nombre important de discontinuités géométriques, ce qui limite la vitesse de balayage et augmente le temps de fabrication. Toutes ces études ont montré le rôle majeur de la stratégie de balayage qui affecte, d'une part, la qualité géométrique et les propriétés mécaniques des pièces et d'autre part, l'efficacité du processus, en termes de vitesse et de productivité. Il est ainsi nécessaire de simuler le comportement thermique pour valider l'influence des trajectoires sur la distribution de la température et l'apparition des défauts dans la pièce. Ainsi plusieurs modèles 2D et 3D utilisant les éléments finis aux échelles macroscopiques et microscopiques ont été développés (Hussein, 2013). Aujourd'hui, l'enjeu scientifique principal est de pouvoir simuler de façon suffisamment rapide et représentative l'évolution de la thermique dans le processus de lasage de type LPBF afin de choisir les meilleures trajectoires de lasage. Les travaux présentés dans cette communication exploitent un modèle thermique analytique qui permet une analyse rapide des trajectoires de lasage pour chacune des couches. Le modèle et son implémentation numérique pour un calcul rapide sont tout d'abord présentés puis validés dans le cas de l'alliage Ti6Al4V par comparaison avec une simulation obtenue par un logiciel industriel. La méthode proposée est ensuite mise en œuvre pour analyser des trajectoires couramment utilisées dans la littérature et dans l'industrie afin de les qualifier vis-à-vis des critères de température maximale et gradients de température, représentatifs des contraintes résiduelles.

2 Modélisation thermique

2.1 Description physique du modèle

Au cours du procédé LPBF, lorsque le faisceau laser irradie la surface du lit de poudre, son énergie est transférée sous plusieurs formes : une fraction de l'énergie est absorbée par la poudre, tandis que le reste est réfléchi. L'énergie absorbée provoque l'augmentation de la température de la matière au-delà de son point de fusion. Une deuxième partie de l'énergie restante est transférée par conduction dans la pièce ou bien perdue soit par convection ou par rayonnement de la surface vers l'atmosphère. La distribution spatiale et temporelle du champ de température est définie par l'équation de la chaleur (Equ.1) :

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + Q \quad (1)$$

avec ρ la densité (Kg m^{-3}), C la chaleur spécifique ($\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), T la température (K), t le temps, λ la conductivité thermique ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$), Q la chaleur interne générée par le laser (W m^{-3}). Les conditions aux limites à la surface s'écrivent comme suit (Equ.2) :

$$-K \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} = q - q_c - q_r \quad (2)$$

avec q le flux surfacique du laser (W m^{-2}), q_c la perte par convection (W m^{-2}) et q_r la perte par rayonnement (W m^{-2}).

Le lit de poudre est chauffé à une température de préchauffage égale à T_0 (373 K) pour $t = 0$.

Dans cette étude, certaines hypothèses ont été adoptées qui sont des hypothèses courantes dans le domaine de la simulation du procédé LPBF (Forslund, 2014) :

- La distribution de l'énergie est supposée être de forme gaussienne
- La conductivité et l'absorptivité utilisées sont celles du matériau à l'état solide
- Les propriétés physiques des matériaux sont constantes
- Les pertes radiatives et par convection sont considérées comme nulles
- La chaleur provenant du changement de phase est négligeable

Dans ce cadre, le problème thermique de fusion de poudre se ramène à un problème de conduction après l'interaction laser matière. Afin de résoudre ce problème, la méthode « Flash », peut être utilisée grâce à une formulation explicite de l'évolution de la température en surface au cours du temps.

2.2 Présentation de la méthode Flash

La méthode Flash (Parker, 2004), est une méthode usuellement utilisée pour la mesure de la diffusivité thermique des matériaux. L'idée consiste à solliciter un échantillon, d'épaisseur L et semi-infini radialement, sur sa face avant par une excitation impulsionnelle $\delta(t)$ (Dirac), spatialement de forme gaussienne, de rayon R . On mesure ensuite sa réponse impulsionnelle en température sur la surface irradiée. L'échantillon est supposé être homogène, isotrope et opaque.

La traduction mathématique de ces phénomènes conduit à l'équation différentielle suivante (Cernuschi, 2001) :

$$\nabla^2 T(r, z, t) = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} \quad (3)$$

avec α la diffusivité thermique du matériau. Pour la surface avant ($z = 0$), un flux est défini par l'équation suivante (Equ.4) :

$$-\lambda \frac{\partial T(r, z = 0, t)}{\partial z} = \frac{2AQ_l}{\pi R^2} \cdot e^{-\frac{2r^2}{R^2}} \delta(t) \quad (4)$$

avec R le rayon du faisceau laser (m), A coefficient d'absorption du matériau (%) et Q_l l'énergie du laser (J). Sur la surface opposée ($z = L$), un flux constant est appliqué :

$$-\lambda \frac{\partial T(r, z = L, t)}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

L'énergie du laser est calculée comme suit (Equ.6)

$$Q_l = P \cdot \Delta f \quad (6)$$

avec Δf la durée élémentaire (s) de l'émission du laser.

La résolution analytique de l'équation (Equ.3), mène à la formulation suivante :

$$T_f(r, z, t) = \frac{2AQ_l}{\varepsilon \sqrt{\pi^3 t}} \cdot \frac{1}{R^3 + 8\alpha t} \cdot e^{-\frac{2r^2}{R^2 + 8\alpha t}} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-\frac{[(n-1)L + \frac{z}{2}]^2}{\alpha t}} \quad (7)$$

avec ε l'effusivité thermique du matériau ($\text{J k}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1/2}$).

Le modèle est valide à partir d'un instant t_0 qui répond à la condition suivante (Equ.8) :

$$t_0 \geq 10 \cdot \Delta f \quad (8)$$

Cette méthode permet alors de calculer l'évolution de la température sur une surface au cours du temps après une excitation thermique infiniment brève et répartie de façon gaussienne. Un exemple obtenu dans ce cadre, à différents instants, pour une plaque d'alliage de Titane (Ti6Al4V), est présenté sur la Figure 1. Le Tableau 1 regroupe les paramètres du procédé et les propriétés du matériau utilisés dans ces simulations.

Tableau 1 : Paramètres de simulation

Puissance : $P = 500 \text{ W}$	Conductivité thermique : $\lambda = 15 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Rayon du fuseau laser : $R = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$	Chaleur spécifique : $C = 800 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Vitesse de déplacement $V = 1 \text{ m s}^{-1}$	Densité : $\rho = 4420 \text{ Kg m}^{-3}$
Coefficient d'absorption : $A = 30 \%$	Température de préchauffage : $T_0 = 373 \text{ K}$

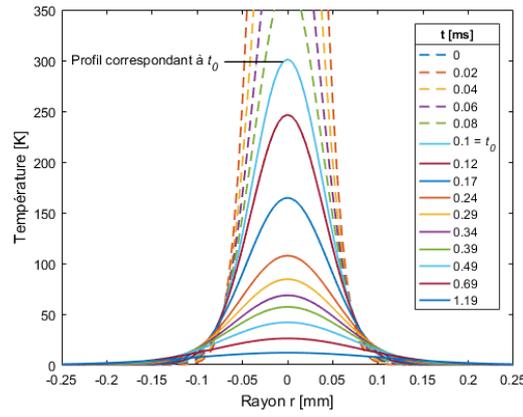


Figure 1 : profils simulés de température en surface pour un flash

Comme on peut le voir sur la Figure 1, suite à un flash, le profil de température résultant devient moins intense et plus large au fur et à mesure que le temps s'écoule. Ce comportement traduit la diffusion radiale de l'énergie.

2.3 Méthodologie de simulation

L'effet thermique d'un flash T_f peut être considéré comme étant la réponse impulsionnelle de la pièce et défini par la convolution avec l'excitation de Dirac $\delta(t)$:

$$(T_f * \delta)(r, z, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} T_f(r, z, t - \tau) \cdot \delta(t - \tau) d\tau \quad (9)$$

Le principe retenu pour simuler le comportement thermique du procédé sur une trajectoire de lasage consiste à traduire le passage du laser comme une succession de sollicitations impulsionnelles. L'irradiation du laser sur la poudre selon une trajectoire donnée est donc exprimée par la fonction de Heaviside $\mathcal{U}(t)$ qui reflète l'état du laser :

$$\mathcal{U}(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

La température globale T_g à l'instant t et en chaque point (x, y, z) de la pièce est la somme cumulée des réponses impulsionnelles des flashes qui sont imposés jusqu'à cet instant suivant la trajectoire définie. Mathématiquement, elle correspond à la convolution entre la fonction $\mathcal{U}(t)$ et l'effet thermique du flash élémentaire qui se déplace sur la surface le long de la trajectoire. La température globale T_g en chaque point (x, y, z) en fonction du temps est exprimée par :

$$T_g(x, y, z, t) = T_0 + \int_{-\infty}^{+\infty} T_{f_i}(r_i, z, t - \tau) \mathcal{U}(\tau) d\tau \quad (11)$$

où r_i représente la distance radiale entre chaque centre de chaque flash et le point de coordonnées (x, y, z) et T_0 la température de préchauffage de la poudre.

La forme discrétisée de l'équation Equ.11 avec un pas temporel Δt s'écrit alors :

$$T_g(x, y, z, t) = T_0 + \sum_{i=0}^n T_{f_i}(r_i, z, t - i \cdot \Delta t) \quad \text{avec} \quad n = \left\lfloor \frac{t}{\Delta t} \right\rfloor \quad (12)$$

La discrétisation spatiale de la trajectoire est définie par le pas dl calculé en fonction du pas temporel Δt et de la vitesse de déplacement du laser V :

$$dl = V \cdot \Delta t \quad (13)$$

Une fois la discrétisation de la trajectoire effectuée, le principe consiste à sommer les effets thermiques en appliquant un flash en chaque point de la trajectoire pour calculer la réponse en température globale en chaque point de la pièce et à chaque instant.

2.4 Calibration et validation du modèle

Le modèle Flash est recalé par un calcul 3D par éléments finis dans le logiciel ESI (ESI, 2019). Les deux simulations sont effectuées sur une trajectoire de type segment (Figure 2a) pour le recalage. Les températures simulées sont comparées en un point $pt1$ situé sur la surface de la pièce. Comme le modèle flash n'intègre pas nativement les changements de phase, les températures atteintes avec ce modèle sont plus élevées et les cycles de refroidissement associés sont plus longs (Figure 3a).

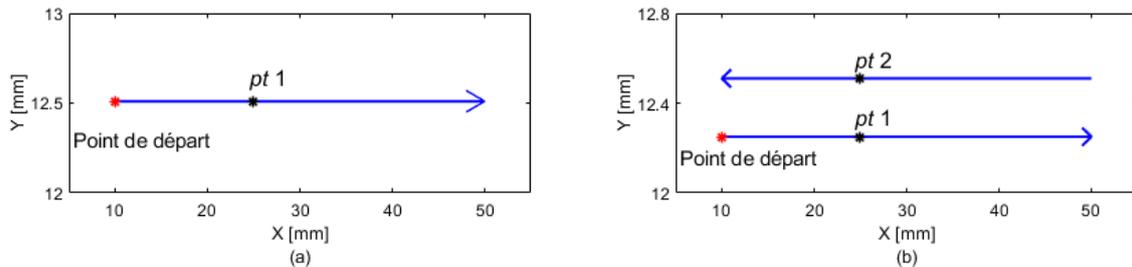


Figure 2 : Trajectoires testées de type segment (a) et zigzag (b)

Pour calibrer le modèle Flash, un coefficient supplémentaire est attribué à l'énergie transférée au matériau (Equ.14) pour tenir compte des limites du modèle Flash par rapport aux hypothèses mentionnées ci-dessus. Dans le cas de l'étude et des paramètres associés (Tableau 1), ce coefficient est fixé à 0,4.

$$T_g(x, y, z, t) = T_0 + \gamma \sum_{i=0}^n T_{fi}(r_i, z, t - i \cdot \Delta t) \quad (14)$$

Le recalage du modèle Flash par rapport au modèle ESI a permis d'obtenir une bonne similitude entre les profils de température lors des cycles thermiques, de chauffage et de refroidissement (Figure 3b).

Une fois le recalage effectué, la simulation a été validée sur de nouveaux points de mesure pour une trajectoire en zigzag (Figure 2b). Les résultats de la méthode Flash et ceux du logiciel ESI présentent des courbes de variation de température très similaires.

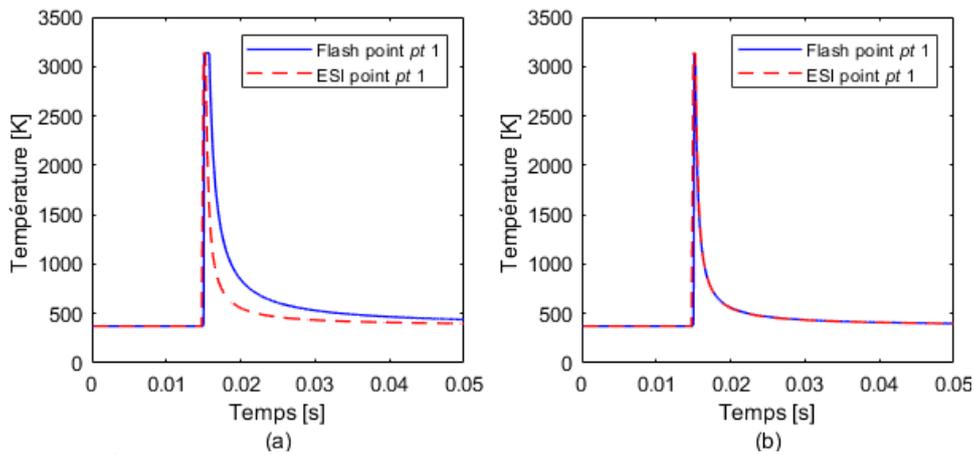


Figure 3 : Évolution de la température au point pt1 (a) avant recalage, (b) après recalage

Les grands pics présentés sur les courbes (Figure 4) montrent que les températures simulées lors du passage du laser sur les points de mesure sont semblables. Les températures simulées pour un passage du laser distant radialement présentent de légers écarts pour la montée en température. Cet effet est illustré par les petits pics sur les courbes (Figure 4). Ce phénomène traduit la limite de la méthode Flash à capter la dissipation radiale de la chaleur. Ici l'erreur maximale mesurée est égale à 50 K. Cette valeur n'a pas un grand effet dans la simulation, car elle est détectée dans une zone éloignée de la zone d'intérêt où il y a un grand changement thermique. La simulation de la température lors du passage du laser sur un point montre que sa valeur augmente de manière très rapide. Ceci prouve que le transfert axial de la chaleur dans le sens de balayage est faible par rapport à la dissipation radiale. Il est clair que la vitesse du laser est plus importante que la vitesse de propagation de la chaleur dans le sens de balayage.

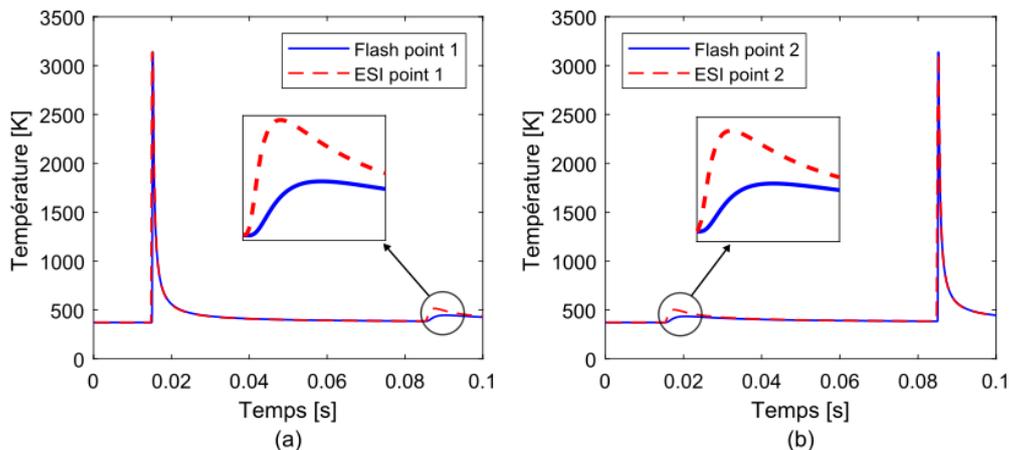


Figure 4 : Évolution de la température (a) au point pt1, (b) au point pt2

2.5 Étude de cas

Pour illustrer la méthode Flash, une trajectoire de type zigzag a été testée dans le cas d'une pièce de taille : $2 \times 0,5 \times 0,15 \text{ mm}^3$. Le temps de calcul est de 210 s pour des paramètres de discrétisation de $10 \mu\text{m}$ en pas spatial et de $10 \mu\text{s}$ en pas temporel. Les cartographies du champ de température sur la surface supérieure de la pièce à deux instants différents sont représentées sur la Figure 5.

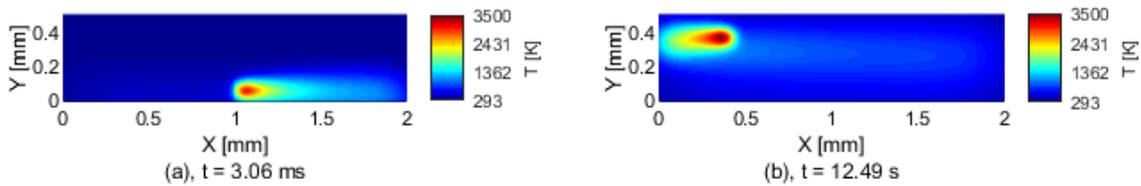


Figure 5 : Cartographies de température à deux instants différents

La simulation montre que les températures sont supérieures à la température de fusion du matériau (1773 K). Le bain de fusion se crée et se déplace avec la source de chaleur. Les tracés montrent également une trainée de chaleur, de forme elliptique, qui devient de plus en plus grande avec le déplacement du laser et l'augmentation de la température. Les températures simulées sont très élevées et peuvent atteindre la température d'évaporation du matériau (3500 K). Par conséquent, les températures sont localement plafonnées à la température d'évaporation lors de la simulation.

3 Analyse thermique des trajectoires de lasage

Cette partie étudie l'influence des stratégies de lasage sur le champ de température d'une surface de section 1x1 mm². Pour se faire, les quatre trajectoires de la Figure 6 sont testées : zigzag (a), lignes parallèles (b), contour de l'extérieur vers l'intérieur (c) et contour de l'intérieur vers l'extérieur (d). La cartographie représente les champs de température maximale pour tout point de la surface.

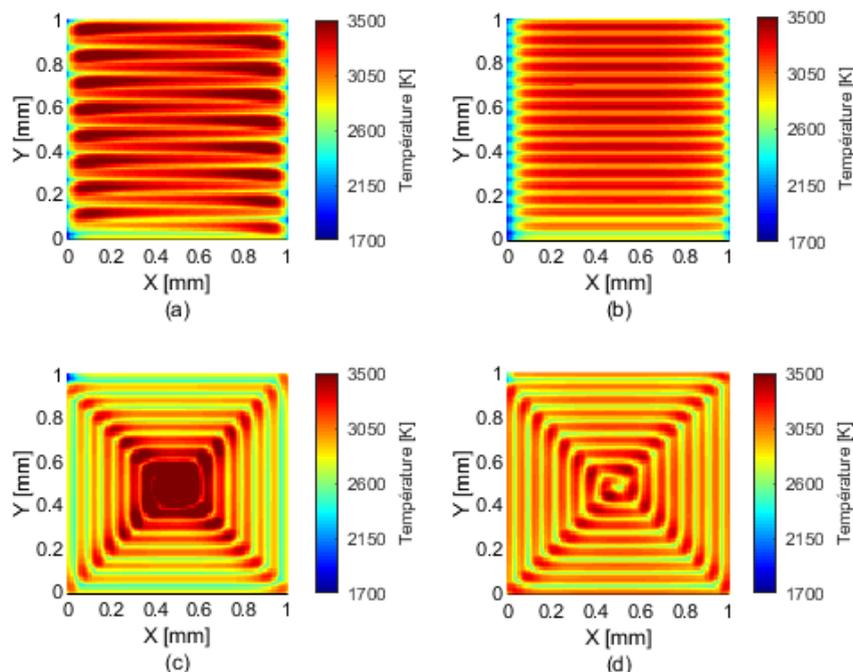


Figure 6 : Cartographies de température maximale

Comme le montre la Figure 6a, la trajectoire en zigzag conduit à des zones de surchauffe sur les bords, où, en plus de faire fondre la zone locale, le laser apporte un préchauffage supplémentaire pour le début de la ligne suivante ce qui tend à atteindre une température plus élevée. La stratégie en lignes parallèles (Figure 6b) permet d'obtenir

une carte de température plus homogène avec une stabilisation de la température après quelques lignes. La mesure de la température maximale atteinte par la trajectoire en contours met en évidence le problème de surchauffe au niveau du centre et montre que cette zone est plus critique quand le laser balaye la surface de l'extérieur vers l'intérieur (Figure 6c). En effet, ce balayage centre isole la zone intérieure thermiquement au fur et à mesure que la source avance et entraîne une accumulation de la chaleur au centre. Toutefois, la trajectoire qui commence du centre vers le bord de la pièce permet de mieux contrôler la température et génère une cartographie thermique plus homogène (Figure 6d). De plus, il y a une augmentation de la température au niveau des angles droits de chaque contour. Les résultats thermiques obtenus sont comparables à des analyses effectuées antérieurement (Jhabvala, 2010).

Les gradients thermiques au cours de la fabrication par LPBF provoquent des déformations plastiques importantes ainsi que des contraintes résiduelles dans la pièce après refroidissement (Hussein, 2013). Les gradients thermiques maximaux enregistrés sur la surface pour une trajectoire donnée, à l'instant t , sont définis comme suit :

$$G_{max} = \max_t(\|\vec{\nabla}T(x, y, z, t)\|) \quad (15)$$

La Figure 7 représente les gradients thermiques maximaux enregistrés sur la surface au cours du temps pour les quatre trajectoires.

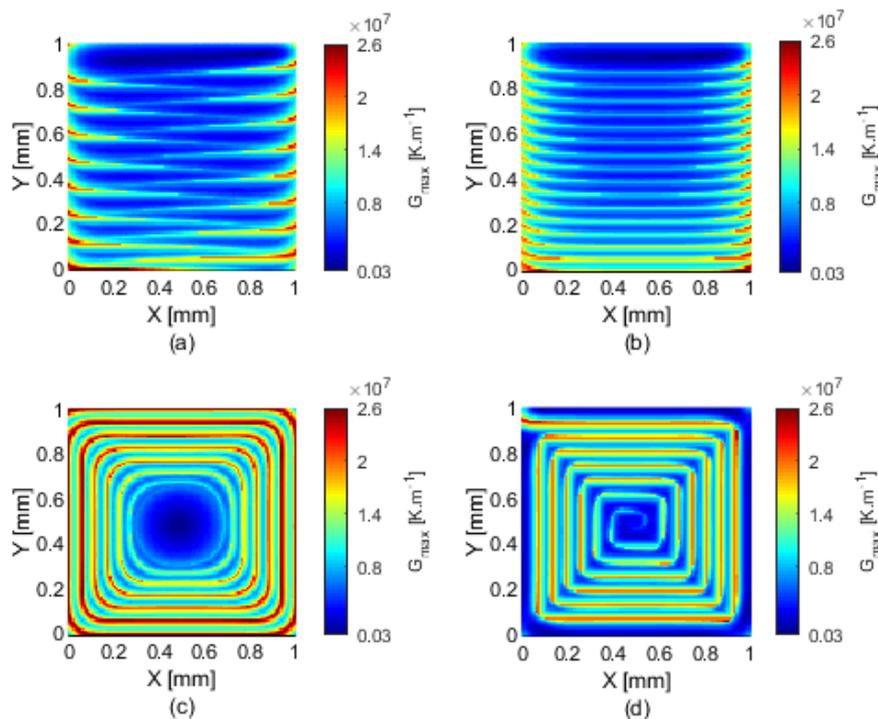


Figure 7 : Cartographies des gradients thermiques maximaux

En général, les zones en surchauffe provoquent d'importants gradients thermiques dans la zone affectée thermiquement. L'augmentation de la température au début de chaque ligne de balayage de la trajectoire en zigzag génère des gradients thermiques dans les parties solidifiées des précédents cordons (Figure 7a). La trajectoire en contours

présente d'importants gradients, notamment quand le laser balaye la surface de l'extérieur vers l'intérieur (Figure 7c). Dans le cas de la trajectoire en contours, le spot laser met plus de temps pour rejoindre une portion déjà fusionnée ; la température a eu le temps de baisser par conduction. Le passage du laser, à côté de cette zone, génère alors une variation de température plus importante. En ce sens, l'effet de la stratégie de balayage est ainsi clairement visible sur les gradients thermiques maximaux.

4 Conclusion

Ce papier présente la méthode Flash pour simuler l'évolution de champ de température et la répartition des contraintes thermiques au cours de la fabrication d'une couche. L'intérêt principal de cette méthode est la relative confiance des résultats en regard de la rapidité des calculs. Ces temps courts rendent possible l'analyse des comportements thermiques en fonction du mode de balayage de la surface. Cependant, le modèle proposé ne tient pas compte de la variation des propriétés thermiques du matériau en fonction de son état physique et de la température. De plus, les pertes et la chaleur provenant du changement de phase sont négligées. Ces hypothèses peuvent influencer sur la précision des résultats de simulation. Les analyses thermiques effectuées dans cette étude confirment que la stratégie de lasage influe grandement sur le niveau de la température et la distribution des gradients thermiques dans la pièce. Par comparaisons relatives, elles permettent de sélectionner la trajectoire qui semble alors la plus adaptée afin d'assurer une cartographie thermique la plus homogène possible réduisant les gradients thermiques et donc les contraintes résiduelles.

Remerciements

Ces travaux sont effectués dans le cadre du projet SOFIA (Solution pour la Fabrication Industrielle Additive métallique) financé par Bpifrance.

Références

- A. Hussein, L. Hao, C. Yan, R. Everson (2013) *Finite element simulation of the temperature and stress fields in single layers built without-support in selective laser melting*. *Materials & Design*, Vol 52, pp.638-647.
- ESI (2019) *Engineering systems international, metallic additive manufacturing process simulations*, <https://www.esi-group.com/software-solutions/virtual-manufacturing/additive-manufacturing>.
- F. Cernuschi, A. Russo, L. Lorenzoni, A. Figari (2001) *In-plane thermal diffusivity evaluation by infrared thermography*. *Review of Scientific Instruments*, Vol 72 (10), pp.3988-3995.
- J. Jhabvala, E. Boillata, T. Antignac, R. Glardon (2010) *On the effect of scanning strategies in the selective laser melting process*, *virtual and physical prototyping*, Vol 5 (2), pp.99-109.
- J. Fuh, Y. Yang, H. Loh, Y.G. Wang (2002) *Equidistant path generation for improving scanning efficiency in layered manufacturing*, *Rapid Prototyping Journal*, Vol 8 (1), pp.30-37.
- K. Kempen, L. Thijs, B. Vrancken, S. Bols, J.V. Humbeeck, J.P. Kruth (2013) *Producing crack-free, high density M2 HSS parts by Selective Laser Melting: Pre-heating the baseplate*, *24th International SFF Symposium - An Additive Manufacturing Conference*, pp.131-139.
- N. Chantarapanich, L. Apinya, W. Sirikul, J. Pongnarin, C. Prasert, S. Sedthawatt, P. Puttisak, S. Kriskrai (2014) *Fabrication of three-dimensional honeycomb structure for aeronautical applications using selective laser melting: a preliminary investigation*, *Rapid Prototyping Journal*, Vol 20 (6), pp.551-558.
- R. Forslund, A. Snis, S. Larsson (2018) *Analytical solution for heat conduction due to a moving Gaussian heat flux with piecewise constant parameters*, *Materials (Basel)*, Vol 12, pp.227-240.
- W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Bulter, G.L. Abbott (2004) *Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity*. *Journal of Applied Physics*, Vol 32 (9), pp.1676-1684.
- Y. M. Huang, H. Lan (2005) *Path planning effect for the accuracy of rapid prototyping system*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol 30 (3), pp.233-246.