

Optimisation de trajectoire pour le procédé de fabrication Laser Powder Bed Fusion (LPBF)

M. Boissier^{1,2}, G. Allaire¹, C. Tournier²

¹ CMAP, Ecole Polytechnique, CNRS UMR7641, {mathilde.boissier;allaire}@cmap.polytechnique.fr

² LURPA, ENS Paris Saclay, christophe.tournier@lurpa.ens-paris-saclay.fr

Résumé — Le procédé de fabrication additive par fusion laser sur lit de poudre (LPBF) est un procédé couche par couche consistant à faire fusionner de la poudre au passage d'un laser. Malgré les nombreux avantages qu'elle présente, cette méthode de fabrication induit des défauts dans la pièce. Le choix des trajectoires du laser est alors primordial. En effet, la qualité et la vitesse de fabrication en sont toutes deux tributaires. On s'intéressera ici à l'utilisation et l'adaptation des outils classiques d'optimisation de forme pour l'optimisation des trajectoires de lasage.

Mots clés — fabrication additive, Selective Laser Melting, Laser Powder Bed Fusion, optimisation de forme, trajectoire de lasage.

1 Introduction

La fabrication additive LPBF consiste en une construction couche par couche d'un objet. Chaque couche est réalisée suivant le même schéma : de la poudre métallique est déposée uniformément, puis, selon une trajectoire programmée, un laser vient déposer de l'énergie sur cette poudre, entraînant sa fusion et sa solidification [4]. Cette méthode présente de nombreux avantages. En effet, elle permet par exemple la fabrication d'objets personnalisés ou encore la réalisation de pièces plus complexes. Cependant, elle introduit des règles de conception strictes comme, par exemple, de prévoir des supports pour les pièces présentant de faibles angles d'inclinaison, d'anticiper le fait qu'il faudra "vider" la poudre piégée dans la pièce à la fin de la fabrication ou encore de prendre en compte les défauts thermiques et mécaniques introduits à la fabrication. Ce sont ces derniers qui nous intéressent ici. L'absorption de l'énergie du laser par la poudre fait plus que simplement fusionner le métal. Elle induit en particulier des contraintes à l'intérieur de la pièce, de la dilatation, des effets de tension de surface lors de la phase liquide. L'objectif de ce travail est de trouver une trajectoire permettant d'optimiser certains de ces effets, et dans un premier temps, on cherchera à minimiser la dilatation thermique caractérisant la pièce finale. Le modèle physique utilisé sera tout d'abord introduit (Section 2) avant de faire un bref état bibliographique des trajectoires utilisées jusque là (Section 3). On posera ensuite le cadre de l'optimisation de forme pour une trajectoire (et donc une ligne continue) en deux dimensions suivi des premiers calculs pour optimiser la fusion de la plaque sans et avec une contrainte sur la longueur de la trajectoire (Section 4). Enfin, on présentera le travail futur et les perspectives de cette étude (Section 5).

2 Modélisation du procédé LPBF

2.1 Les échelles de la modélisation

Lors de la fabrication d'une couche, on assiste à la transformation de la poudre en une phase liquide, le bain de fusion, qui, en refroidissant, forme une phase solidifiée. Que ce soit d'un point de vue physique, mécanique ou thermique, de multiples phénomènes sont mis en jeu et une modélisation précise est nécessaire (Figure 1). Celle-ci peut se faire selon deux échelles :

- *échelle microscopique* [5, 9] : elle prend en compte une modélisation fine du bain de fusion et donc du passage de la poudre à une phase liquide avant une solidification. La variation des grandeurs caractéristiques du matériau avec la température est prise en compte de même que les

effets mécaniques qui résultent de la présence de la phase liquide. Ainsi, les effets de tension de surface sont modélisés. Si cette échelle permet une description très précise à la fois de la physique et de la mécanique intervenant lors du passage du laser, modélisant bien les défauts liés au processus de fabrication, elle implique la résolution de nombreuses d'équations souvent non linéaires. Le coût de calcul des différentes grandeurs à cette échelle est élevé.

- *échelle macroscopique [9, 2]* : elle "oublie" la présence de la phase liquide pour ne conserver que les états "poudre" et "solide". Le changement de phase est modélisé brutalement par une modification des grandeurs caractéristiques des matériaux, et seuls trois phénomènes thermiques sont considérés : la conduction, la convection et la radiation. L'absorption d'énergie par la poudre est simplifiée. Si cette approche ne permet pas une description précise des phénomènes induits par la phase liquide, elle permet un premier calcul de la dilatation thermique et des contraintes résiduelles apparaissant dans le solide et liées au procédé. Le calcul est ici beaucoup plus rapide et permet d'envisager de l'optimisation.

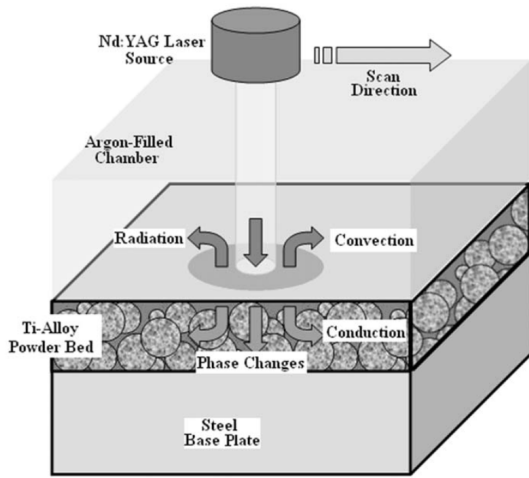


FIGURE 1 – Schéma du procédé LPBF [12]

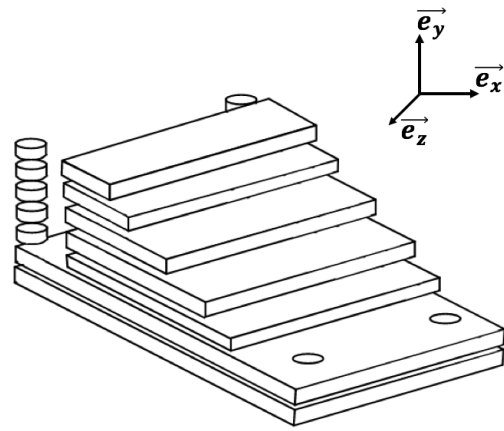


FIGURE 2 – Décomposition en couches

2.2 Choix du modèle d'étude

On s'intéresse ici à la fusion d'une pièce \mathcal{P} et en particulier à l'optimisation de la trajectoire de lasage pour chaque couche D . On souhaite fusionner l'intégralité de la pièce en maîtrisant la dilatation thermique. Aussi, les quantités étudiées sont macroscopiques et on néglige la dimension microscopique dans notre modèle. Seuls les états de poudre et de solide sont considérés et les grandeurs physiques telles que la conductivité λ , la densité ρ , la capacité thermique c_p , le tenseur de Hooke C et le coefficient de dilatation thermique, α_{th} sont de la forme

$$A(x) = A_{solide}\chi_{solide}(x) + A_{poudre}(1 - \chi_{solide}(x)), \quad (1)$$

avec $\chi_{solide} : x \in \Omega \rightarrow \chi_{solide}(x) \in \{0, 1\}$ la fonction caractéristique du solide, valant 1 aux points où la poudre a déjà fusionné et 0 là où le métal est encore sous forme de poudre.

De plus, la convection et le rayonnement sont négligés pour ne conserver que la conduction. Le bord de la couche est constitué de poudre considérée adiabatique. Aucun transfert de chaleur n'est donc permis entre la couche D et l'extérieur. Enfin, seule la source liée au laser est considérée et toute source de chaleur volumique est négligée.

On obtient alors l'équation thermique [2] correspondant à l'équation (2).

$$\begin{cases} \rho c_p \partial_t T - \text{div}(\lambda \nabla T) = 0, & (t, x) \in (0, t_F) \times D \\ \nabla T \cdot n = q, & (t, x) \in (0, t_F) \times \partial D \\ T(0, x) = T_0 & x \in D. \end{cases} \quad (2)$$

La dilatation thermique a pour expression $\alpha_{th}(T - T_0)$, avec α_{th} le coefficient de dilatation thermique. Ainsi, nul besoin de l'équation mécanique pour ce travail.

On précise la modélisation de la source. On considère classiquement que le laser est un faisceau gaussien et on a [5] :

$$q(r) = \frac{fP}{\pi r_b^2} \exp\left(-f \frac{r^2}{r_b^2}\right) \quad (3)$$

avec f le facteur de distribution, P la puissance totale de la source, r_b le rayon de la source, r la distance d'un point au centre de la source. On simplifie cette expression pour garder, en considérant les paramètres P et C_g comme les nouveaux paramètres du laser,

$$q(r) = P \exp(-C_g r^2). \quad (4)$$

On se restreint à un modèle en deux dimensions (\vec{e}_x, \vec{e}_y) de la plaque. On travaille donc maintenant sur le domaine en deux dimensions Σ correspondant à une couche. On modélise la conduction selon l'axe \vec{e}_z par un terme de perte dans l'équation de la chaleur (voir Figure 2 pour le choix de la base). En prenant δ une épaisseur caractéristique, $\kappa = \rho c_p$, λ_{solide} la conductivité de la phase solide et λ la fonction conductivité, dépendant de l'espace et définie selon l'Équation (1), on obtient l'équation de la chaleur finale considérée dans notre étude :

$$\begin{cases} \kappa \partial_t T - \lambda \Delta T + \frac{\lambda_{solide}}{\delta^2} T = q, & (t, x) \in (0, t_F) \times \Sigma \\ \nabla T \cdot n = 0, & (t, x) \in (0, t_F) \times \partial \Sigma, \\ T(0, x) = T_0(x), & (t, x) \in (0, t_F) \times \Sigma. \end{cases} \quad (5)$$

Enfin, on considère solide tout point pour lequel la température a été, en un temps t de la simulation, supérieure à une température de changement de phase.



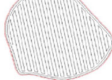



2.3 Simulation

Grâce à l'équation précédente et en choisissant une répartition gaussienne de la source, on peut alors déterminer la température à l'intérieur de la pièce à chaque instant. La Figure 3 présente la source et la température induite respectivement aux temps t_1 et t_2 d'une simulation pour une trajectoire en ligne droite. On a pris pour cette simulation une température initiale $T_0 = 30^\circ C$, une température de changement de phase $T_{ph} = 500^\circ C$, une puissance du laser $P = 768000 * 10^4 W.m^{-2}$, l'étalement de la source $C_g = 100 m^{-2}$, $c_{p,poudre} = c_{p,solide} = 450 J.kg^{-1}.^\circ C^{-1}$, $\rho_{solide} = 8000 kg.m^{-3}$, $\rho_{poudre} = 4000 kg.m^{-3}$, $\lambda_{poudre} = 0.25 W.m^{-1}$, $\lambda_{solide} = 15 W.m^{-1}$, $\delta = 0.00005 m^{-1}$. Tous les calculs éléments finis dans ce travail ont été réalisés en utilisant le logiciel FreeFem [7].

3 État de l'art des trajectoires de lasage

Avant de présenter la méthode développée, les principales trajectoires étudiées dans la littérature pour la fabrication additive métallique sont présentées. Les résultats, présentés dans le Tableau 1, donnent les principaux types de trajectoires [6].

TABLE 1 – Différents types de trajectoire

Lignes parallèles	Contour	Hybride	Spirale	Continue (fractale, ...)	Medial Axis Transformation
					

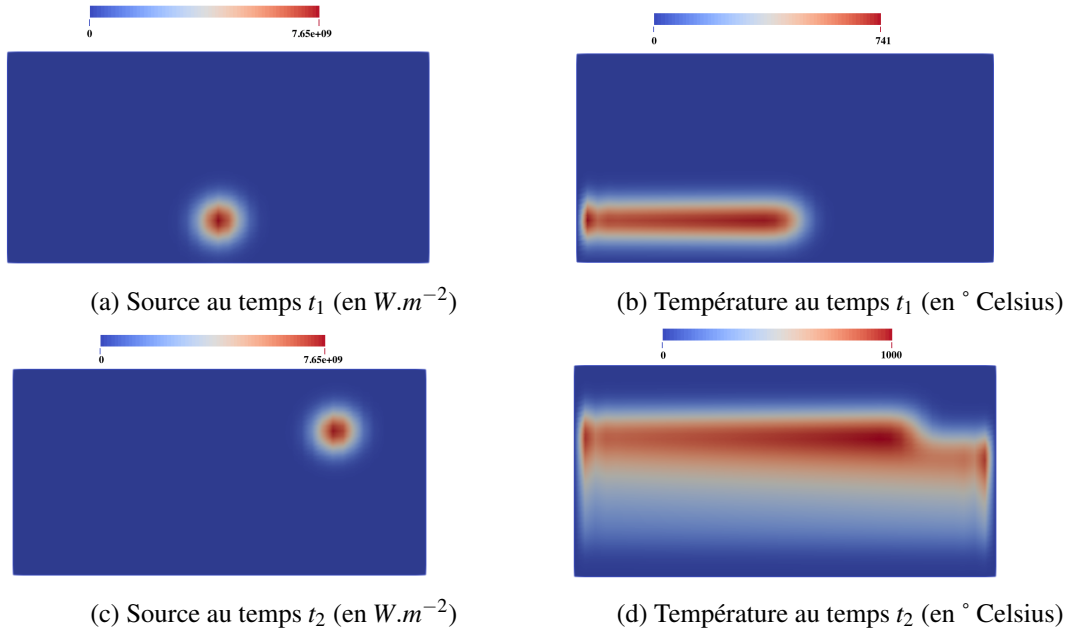


FIGURE 3 – Évolution de la température en fonction du temps

Des techniques mixant ces différentes trajectoires sont aussi utilisées. Dans certaines études mettant en jeu des algorithmes génétiques par exemple, l'objet est divisé en cellules et 6 trajectoires sont choisies. L'objectif est alors de déterminer laquelle de ces 6 trajectoires correspond le mieux à chaque cellule et dans quel ordre les fusionner [10].

Si les différentes trajectoires peuvent s'adapter, on ne trouve pas d'approche systématique, non basée sur une forme pré-établie. C'est justement l'objet du travail présenté ici.

4 Adaptation des outils d'optimisation de forme à l'optimisation de trajectoire

4.1 Généralités sur l'optimisation de forme

La théorie mathématique de dérivation de forme, initiée par Hadamard, et largement développée depuis, peut maintenant être utilisée pour de l'optimisation [8, 1, 3]. Elle consiste à faire évoluer un domaine de référence en le transportant par un champ de vecteur.

On considère un domaine de référence Ω_0 . Les formes admissibles sont alors l'ensemble des domaines Ω qui peuvent être reliés à l'ensemble de référence Ω_0 par un champ de vecteur θ de la manière suivante :

$$\Omega = \{x + \theta(x) \mid x \in \Omega_0\}. \quad (6)$$

On en déduit la définition de dérivabilité selon la forme :

Différentiabilité d'une fonctionnelle par rapport à la forme :

soit Ω_0 un domaine ouvert borné. Une fonctionnelle $J : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ est différentiable par rapport à la forme en Ω_0 si l'application $\theta \rightarrow J((I_d + \theta)(\Omega_0))$ est Fréchet-différentiable en 0 sur $C^1(\mathbb{R}^d, \mathbb{R}^d)$, et on a alors :

$$J((I_d + \theta)(\Omega_0)) = J(\Omega_0) + DJ(\Omega_0)(\theta) + o(\theta) \quad (7)$$

avec $DJ(\Omega_0)(\theta)$ est une forme linéaire sur $C^1(\mathbb{R}^d, \mathbb{R}^d)$ et $\lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{o(\theta)}{\|\theta\|} = 0$.

Si le domaine Ω_0 est suffisamment régulier, la fonctionnelle $DJ(\Omega_0)$ ne dépend que de la trace de $\theta \cdot n$ sur la frontière $\partial\Omega_0$, avec n la normale à cette frontière. Optimiser la forme d'un objet Ω revient alors à transporter sa frontière selon la normale à cette frontière (Figure 4).

4.2 Optimisation de trajectoire

On va appliquer les méthodes d'optimisation de forme à l'optimisation d'une trajectoire, Γ . Nous imposons pour cela à la courbe d'être continue et la trajectoire doit donc être "en un seul morceau". Afin de préserver la topologie de la courbe, on choisit de la représenter par une ligne brisée, caractérisée par une suite de points. On peut alors utiliser les outils d'optimisation de forme, transportant chaque point de la courbe selon la normale à cette courbe (Figure 5). On remarque qu'une description fine de la géométrie discrète de la courbe est nécessaire, notamment afin d'avoir accès à une bonne définition de la normale et de la courbure.

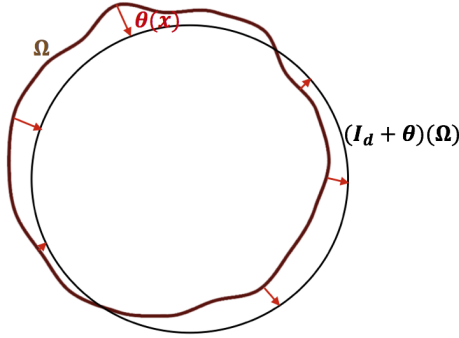


FIGURE 4 – Variation de la forme suivant la normale à la frontière

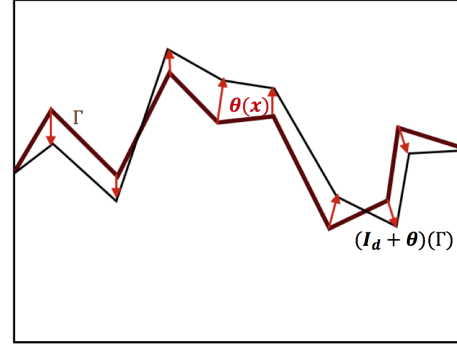


FIGURE 5 – Variation de la trajectoire suivant sa normale

4.3 Mise en application dans le cas stationnaire

On présente ici deux cas d'optimisation simplifiés, validant la modélisation de la courbe et préparant de futures optimisations plus proches des réalités physiques et industrielles.

4.3.1 Minimisation de la longueur de la trajectoire sous contraintes de température pour la fusion d'une plaque

On considère une température de changement de phase T_{ph} et une température maximale T_M . On se place sur une plaque D , dans un cas stationnaire. On remplace la source mobile, symbolisant le mouvement du laser le long de la trajectoire par une source fixe, constituée d'une courbe, $\Gamma \subset D$. Ainsi, au lieu d'être activée par morceau, la courbe est ici activée complètement. On souhaite optimiser cette courbe de manière à minimiser la longueur tout en ayant la température en chaque point comprise entre T_{ph} et T_M . En effet, on souhaite fusionner la plaque et il faut donc,

$$\forall x \in D, \quad T(x) > T_{ph}. \quad (8)$$

On souhaite de plus limiter la dilatation thermique, ce qui est modélisé dans un premier temps par un contrôle de la température maximale dans la pièce et donc,

$$\forall x \in D, \quad T(x) < T_M. \quad (9)$$

Ces conditions sont relatives à chaque point du domaine D considéré. Afin d'agrèger ces conditions, on considère pour le problème d'optimisation les contraintes suivantes :

$$C_{ph}(T) = \int_D [(T_{ph} - T)^+]^2 dx = 0 \quad \iff \quad \forall x \in D, \quad T(x) > T_{ph}, \quad (10)$$

$$C_M(T) = \int_D [(T - T_M)^+]^2 dx = 0 \quad \iff \quad \forall x \in D, \quad T(x) < T_M. \quad (11)$$

Le problème d'optimisation considéré est donc le suivant :

$$\min_{\Gamma} J(\Gamma) = \int_{\Gamma} ds, \quad \text{tel que} \quad \begin{cases} C_{ph}(T) = 0 \\ C_M(T) = 0 \end{cases}$$

avec T solution de

$$\begin{cases} -\Delta T + T = P\chi_{\Gamma} & \text{dans } D \\ \nabla T \cdot n_D = 0 & \text{sur } \partial D. \end{cases} \quad (12)$$

On choisit $P = 50$, $T_{ph} = 100$ et $T_M = 120$. On résout l'équation de la chaleur sur un domaine D carré de côté 2, avec un maillage triangulaire constitué de 3600 éléments. On utilise une méthode de Lagrangien Augmenté [11] pour traiter les contraintes. La Figure 6 présente l'évolution de la trajectoire et de la chaleur au cours de l'optimisation. La Figure 7 représente quant à elle l'évolution de la fonction objectif et des contraintes en fonction des itérations. L'optimum présenté ici n'est pas unique. En changeant les paramètres d'optimisation, et en particulier l'initialisation, on obtiendrait d'autres courbes optimales.

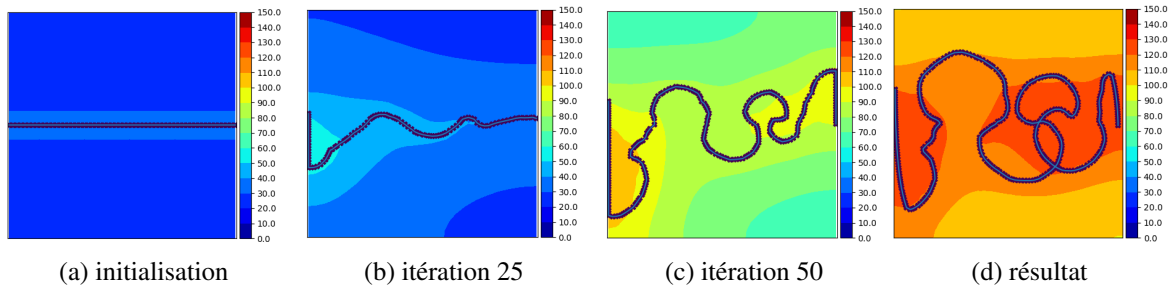


FIGURE 6 – Optimisation de la ligne

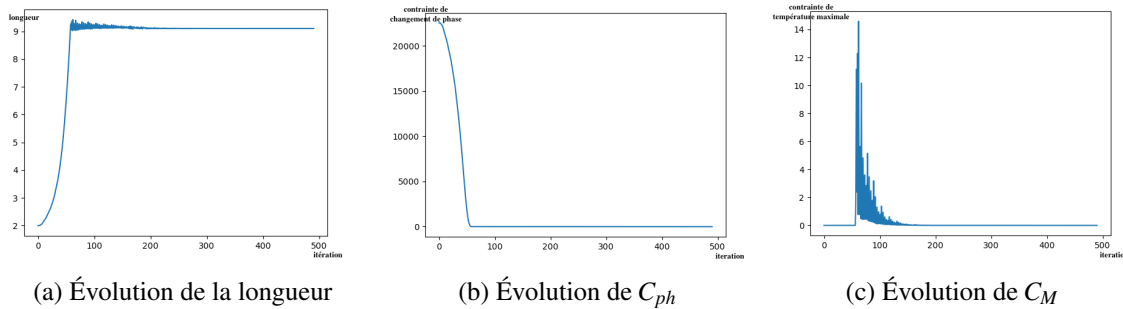


FIGURE 7 – Évolution de la fonction objectif et des contraintes

4.3.2 Minimisation de la longueur de la trajectoire sous contraintes de température pour la fusion d'un cantilever

On décide maintenant de faire fusionner une pièce différente d'un rectangle. Pour cela, on fixe à l'intérieur de la pièce $T_{ph,pièce} = 100$ et $T_{M,pièce} = 130$. A l'extérieur de la pièce, on veut éviter la fusion et on fixe donc $T_{ph,dehors} = 0$ et $T_{M,dehors} = 80$. La Figure 8 présente l'évolution de la trajectoire et de la chaleur au cours de l'optimisation. La Figure 9 représente quant à elle l'évolution de la fonction objectif et des contraintes en fonction des itérations. Si le résultat ne satisfait pas complètement les contraintes, on constate tout de même une adaptation de la trajectoire à la pièce à fusionner.

5 Généralisations à court terme et perspectives à long terme

Ce travail permet une première validation du code et de l'algorithme. En effet, bien que le modèle stationnaire et 2D reste un modèle "jouet", il contient beaucoup des difficultés liées à la mise en place de l'algorithme d'optimisation de forme. Cette validation permet d'envisager de nombreux projets futurs. Les travaux envisagés dans un futur proche ou sur le long terme sont les suivants.

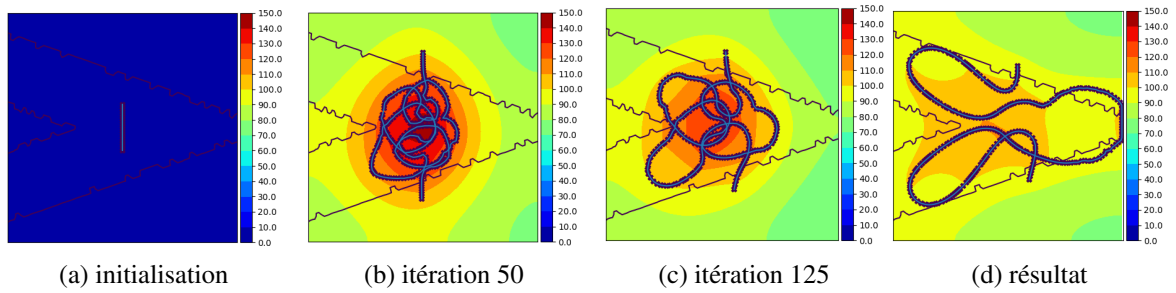


FIGURE 8 – Optimisation de la ligne

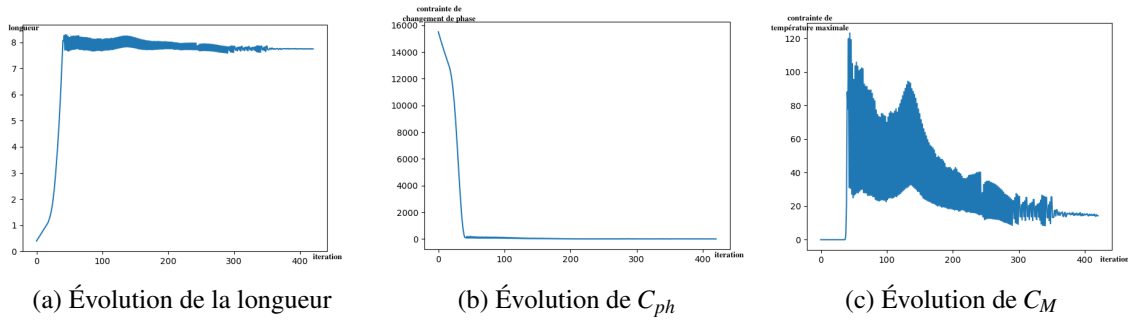


FIGURE 9 – Évolution de la fonction objectif et des contraintes

En stationnaire tout d’abord, on s’intéressera à améliorer le modèle physique, afin de considérer des contraintes plus adaptées au cas étudié. En effet, on pourra étudier de manière plus approfondie les phénomènes de dilatation thermique et contrôler de nouvelles grandeurs telles que le gradient thermique par exemple. L’étude uniquement thermique est utilisée ici pour simplifier l’optimisation. Complexifier ce modèle et s’intéresser à une étude thermo-mécanique sera aussi un des objectifs, couplant le travail présenté avec différents travaux existants [3]. Il est enfin possible de coupler optimisation de forme et optimisation paramétrique et on pourra par exemple optimiser la puissance du laser en même temps que sa trajectoire.

Adapter ce travail au cas instationnaire est bien sûr un autre objectif à court terme. En s’appuyant sur le travail réalisé, on pourra adapter les exemples présentés ici, ainsi que des exemples plus complexes qui auront été réalisés dans le cas stationnaire.

Enfin, on s’intéressera à une simulation en trois dimensions et ainsi obtenir des informations sur l’évolution de la trajectoire en fonction des différentes couches.

En complexifiant peu à peu le modèle, afin de le rendre plus représentatif de la réalité, on obtiendra des trajectoires de plus en plus fiables pour l’industrie. Cette manière plus systématique de les générer permettra d’obtenir des intuitions sur le lien entre celles-ci et la forme de la pièce. Ceci permettrait de déterminer des contraintes sur la forme de la pièce afin de créer des trajectoires plus faciles à réaliser ou limitant les défauts de fabrication. Enfin, nous voudrions coupler l’optimisation de la forme de l’objet et l’optimisation de la trajectoire. Cela permettrait de générer en même temps le design de la pièce à construire et sa trajectoire optimale de fabrication.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le projet SOFIA qui finance ce travail.

Références

- [1] Allaire, G. *Conception Optimale de Structures*. Collection Mathématiques et Applications, Vol 58., Springer Verlag, 2007.

- [2] G. Allaire et L. Jakabčín, *Taking into account thermal residual stresses in topology optimization of structures built by additive manufacturing*, Math. Models Methods Appl. Sci. 28(12) :2313–2366, 2018.
- [3] G. Allaire, F. Jouve, A-M. Toader, *Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method*, J. Comput. Phys. 194(1) :363–393, 2004.
- [4] A. Bernard et C. Barlier *Fabrication additive, du prototypage rapide à l'impression 3D*, Dunod, 2015.
- [5] T. DebRoy, H.L. Wei, J.S. Zuback, et al., *Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties*, Progress in Materials Science 92 :112–124, 2018
- [6] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li et S. Van Duin, *Advanced Design for Additive Manufacturing : 3D Slicing and 2D Path Planning*, New Trends in 3D Printing, InTech, 2016.
- [7] F. Hecht, *New development in FreeFem++*, Journal of Numerical Mathematics, 252–265, 2012.
- [8] A. Henrot, M. Pierre, *Shape variation and optimization. A geometrical analysis*, EMS Tracts in Mathematics, 28, Zürich, 2018.
- [9] M. Megahed, H-W. Mindt, N. N'Dri, H. Duan et O. Desmaison, *Metal additive-manufacturing process and residual stress modeling*, Integrating Materials and Manufacturing Innovation 5(4) :1–33, 2016.
- [10] S. Mohanty, H. JH, *Cellular scanning strategy for selective laser melting : Generating reliable optimized scanning paths and processing parameters*, Proceedings of SPIE, Laser 3D Manufacturing II 9353 :93530U, 2015.
- [11] J. Nocedal, S.J. Wright, *Numerical optimization*, Springer Science+ Business Media, 2006.
- [12] I.A. Roberts, C.J. Wang, R. Esterlein, M. Stanford, D.J. Mynors, *A three-dimensional finite element analysis of the temperature field during laser melting of metal powders in additive layer manufacturing*, International Journal of Machine Tools and Manufacture 49(12-13) :916-923, 2009.