



**HAL**  
open science

# Analyse de l'influence des paramètres de la recette de fabrication sur la trajectoire réelle du laser en LPBF

Baptiste Pous-Roc, Kévin Godineau, Sylvain Lavernhe

► **To cite this version:**

Baptiste Pous-Roc, Kévin Godineau, Sylvain Lavernhe. Analyse de l'influence des paramètres de la recette de fabrication sur la trajectoire réelle du laser en LPBF. Manufacturing'21, UGA, Grenoble INP, CNRS, Jun 2024, GRENOBLE, France. hal-04784353

**HAL Id: hal-04784353**

**<https://hal.science/hal-04784353v1>**

Submitted on 15 Nov 2024

**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.



# Analyse de l'influence des paramètres de la recette de fabrication sur la trajectoire réelle du laser en LPBF

**Baptiste POUS-ROC<sup>(a)</sup>, Kevin GODINEAU<sup>(a)</sup>, Sylvain LAVERNHE<sup>(a)</sup>**

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

*Mail : baptiste.pous--roc@ens-paris-saclay.fr*

**Résumé :** En fabrication additive par fusion laser sur lit de poudre (LPBF), la trajectoire de lasage, la vitesse de parcours et l'énergie apportée sont des éléments cruciaux pour la maîtrise des pièces produites au regard de leurs caractéristiques géométriques, métallurgiques et de leur santé matière. L'étude présentée se focalise sur les aspects cinématiques de la trajectoire effective du laser, afin de prédire le plus fidèlement possible les conditions d'interaction laser-matière. L'article explore comment les paramètres de la « recette de fabrication », en lien avec des paramètres internes de la commande numérique pilotant la tête galvanométrique, influent sur la position et la vitesse réelle du spot laser et donc sur la distribution d'énergie de la couche à fusionner. La méthodologie adoptée implique d'isoler chaque paramètre influant pour examiner leur effet sur la trajectoire. Un plan d'expérience dédié à cet effet est mis en œuvre, combinant des expérimentations sur une machine de fabrication additive ainsi que sur un banc d'essai développé au sein de laboratoire reproduisant la chaîne numérique de la machine. Les relevés sont ensuite comparés aux simulations obtenues à partir d'un modèle réaliste du comportement de la tête galvanométrique et de sa commande. Les résultats de cette étude mettent en lumière le rôle de chacun des paramètres de la recette de fabrication, leurs effets spatiaux et temporels, ainsi que la nécessité de maîtriser quelques paramètres internes à la commande numérique. Une meilleure compréhension des interactions entre les paramètres FAO et les paramètres internes au constructeur rendra possible l'optimisation des trajectoires de lasage.

**Mots clés :** LPBF, trajectoire, commande numérique, cinématique, énergie.

## 1 Introduction

Le procédé PBF-LB (Powder Bed Fusion Laser Beam) consiste à balayer sélectivement un lit de poudre métallique, pour le fusionner localement couche après couche (Figure 1) et créer ainsi des pièces complexes pour des domaines divers tels que l'aérospatiale ou encore la santé. La position du spot laser dans le plan de travail est pilotée par une tête galvanométrique. Celle-ci se compose de deux miroirs qui contrôlent la position du faisceau laser ainsi qu'un troisième actionneur qui déplace une lentille pour ajuster la distance focale du laser.

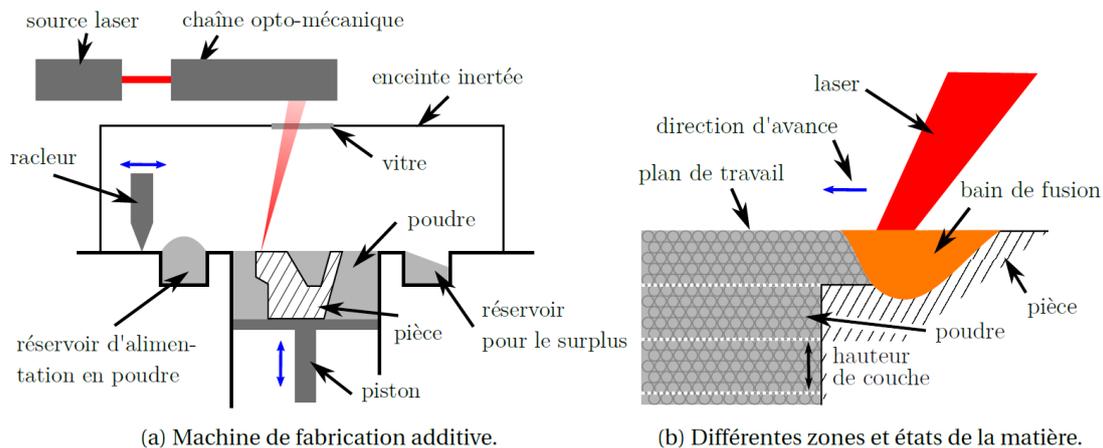


Figure 1: Procédé PBF-LB (Godineau, 2019)

Le maillage issu du modèle CAO de la pièce est utilisé dans un logiciel spécialisé afin de générer la trajectoire FAO que devra suivre le spot laser. Celle-ci peut être assimilée à une série d'instructions de déplacement sur des segments laser allumé ou des segments laser éteint. Ces instructions sont ensuite interprétées et traitées au niveau de la commande numérique avant d'être envoyées et exécutées par la tête galvanométrique.

Les principaux défauts inhérents au procédé PBF-LB sont souvent liés à une mauvaise maîtrise de la répartition énergétique et à des cinétiques de refroidissement différentes au cours de la production. Il est important de noter que ces problématiques thermiques sont intimement liées à des considérations énergétiques et dépendent donc de la géométrie de la trajectoire effective du spot laser et du couple puissance/vitesse du laser comme illustré dans la Figure 2 (Bertoli 2017 ; Zhang, 2017 ; Marques, 2022). À une échelle plus locale, les porosités peuvent résulter d'une fusion insuffisante entraînant des inclusions de poudre non fusionnée dans la pièce. La Figure 2 montre également qu'une trop grande quantité d'énergie entraîne une vaporisation du métal et une instabilité du bain de fusion provoquant des turbulences et un phénomène de cavitation nommé « keyhole » dans la littérature (King, 2014). À l'échelle de la pièce, les écarts thermiques dans le volume de la pièce pendant le refroidissement induisent des contraintes résiduelles qui peuvent entraîner des déformations géométriques fragilisant ainsi la pièce. Ces défauts peuvent conduire à l'échec de la fabrication.

Les défauts précédents sont donc en grande partie dus aux paramètres de la « recette de fabrication » qui ont un impact sur la trajectoire effective du laser et le couple puissance vitesse. Ces paramètres sont trop souvent réglés comme identiques pour chaque couche à l'échelle de la pièce ou pour chaque opération au sein d'une couche de fabrication (de Leon Nope, 2021). Il devient donc nécessaire de maîtriser finement la

trajectoire et les traitements effectués par la CN de la machine pour maîtriser l'apport énergétique.

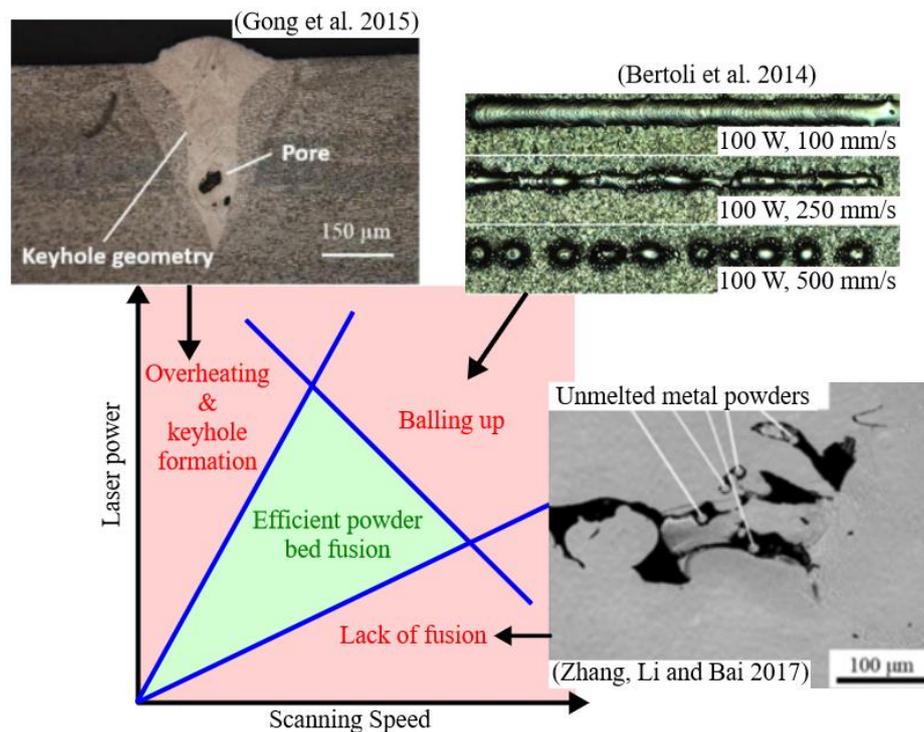


Figure 2: Graphique puissance vitesse et illustration des principaux défauts (Ettaieb, 2022)

Les actionneurs (galvanomètres) permettant de mouvoir le spot laser présentent des capacités cinématiques et dynamiques limitées. Pour tenir compte de ces limitations, les consignes sont filtrées dans la commande numérique afin de ne pas dépasser des seuils d'accélération et de jerk maximal lors des changements de direction. Ce filtrage indispensable a pour effet de ralentir localement la vitesse de balayage du laser et d'arrondir la trajectoire au niveau des angles (Tajima, 2018). Pour compenser les effets du filtrage, des solutions technologiques sont étudiées dans la littérature. Une première solution consiste à ajouter des délais entre chaque instruction élémentaire de déplacement. L'ajout de ces délais entre les segments permet de limiter géométriquement les effets du filtrage (Luo, 2017). Cela entraîne cependant un ralentissement local de la vitesse, ce qui en fabrication additive PBF-LB conduit à exacerber les problématiques énergétiques. Il existe également une seconde solution nommée « skywriting » présentée dans différents articles (Yeung, 2017 ; Taylor, 2022). Cette stratégie consiste à ajouter des segments de trajectoire laser éteint pour que le ralentissement du spot laser induit par le filtrage, les délais ou le comportement cinématique des actionneurs ne s'effectue pas sur la trajectoire FAO où le laser est allumé.

L'objectif de cet article est de mettre en évidence l'impact des traitements effectués par la commande numérique sur la trajectoire effective du spot laser et l'énergie apportée à la matière. Cet article s'attachera plus spécifiquement à qualifier et quantifier l'impact des délais ajoutés et l'impact de la stratégie « skywriting » mentionnés ci-dessus.

## 2 Méthodologie

### 2.1 Paramètres de la recette de fabrication

La « recette de fabrication » est constituée d'un ensemble de paramètres réglés en FAO agissant sur la trajectoire générée et le comportement de la machine. Les paramètres de la recette de fabrication peuvent être séparés en deux catégories.

Tout d'abord les paramètres usuels, dont les valeurs sont systématiquement renseignées dans la littérature. Ils correspondent aux paramètres les plus classiques en fabrication PBF-LB comme la puissance du laser ou encore la vitesse de balayage lorsque le laser est allumé. Ce couple de paramètres agit directement sur l'énergie apportée à la matière et doit donc être choisi en tenant compte des caractéristiques du matériau utilisé. Pour la géométrie de la trajectoire FAO, les paramètres usuels sont : le type de trajectoire employée, contours (une succession de trajets laser allumé) ou remplissages (alternance de trajets laser allumé et laser éteint) ainsi que la distance entre passes. Il existe également un grand nombre de paramètres à l'échelle de la production tels que la hauteur de couche, le débit et la vitesse du flux de gaz dans l'enceinte d'impression, le taux d'oxygène... (Marques, 2022; Narasimharaju, 2022).

En plus des paramètres usuels accessibles par un utilisateur non expert, des paramètres « avancés » trop peu abordés dans la littérature existent. Ces paramètres sont souvent liés à la technologie même de la machine et aux caractéristiques des composants utilisés. Parmi ces paramètres, on peut notamment citer des délais pouvant être insérés entre les différents segments de trajectoire ou encore des délais d'allumage et d'extinction du laser servant à la synchronisation de celui-ci avec la trajectoire (Huang, 2018). Il existe également des paramètres permettant de défocaliser le spot laser (Liu, 2022) ou de modifier localement la trajectoire en utilisant des stratégies de « skywriting » (Taylor, 2022). Ces paramètres agissent sur la trajectoire à une échelle plus locale que les paramètres usuels.

### 2.2 Démarche expérimentale

Les différents essais présentés ci-dessous sont réalisés en effectuant des gravures sur une plaque d'acier et non en lasant une couche de poudre. Cette démarche permet de s'affranchir des problématiques liées à l'interaction laser-matière et au comportement du bain de fusion qui ne sont pas l'objet d'étude de ces travaux. Elle permet aussi d'identifier plus précisément la trace réellement suivie par le spot laser pour la comparer avec la trajectoire FAO.

La Figure 3 montre la trajectoire FAO utilisée dans les différents essais présentés. Elle est représentative de la trajectoire d'une couche d'une pièce réalisée classiquement en PBF-LB. Cette trajectoire est composée d'un remplissage utilisant une stratégie de zigzag ainsi que de deux contours fermés réalisés dans un second temps pour délimiter les bordures de la pièce. La géométrie CAO du contour de la pièce est définie par deux angles aigus orientés vers l'extérieur de la pièce, d'un angle orienté vers l'intérieur et d'un arc de cercle. Ce dernier est traduit par le logiciel de facettisation et par le générateur de trajectoire en une succession de petits segments.

Pour le procédé PBF-LB, la distance entre passes est normalement réglée en tenant compte de la taille du bain de fusion afin d'assurer une continuité radiale des zones fondues. Dans notre application, cet écart entre chaque passe est imposé à 150  $\mu\text{m}$  afin

de pouvoir identifier clairement les trajets gravés sur les mesures optiques. De même, la puissance du laser est réduite à 50 W pour marquer le passage du laser sans provoquer de surfusion. La consigne de vitesse de déplacement du laser est fixée à  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  lorsqu'il est allumé et à  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  lorsqu'il est éteint ; ces vitesses sont représentatives de celles employées lors de la fusion de poudre. Enfin, les paramètres d'allumage et d'extinction du laser sont réglés afin de synchroniser celui-ci avec la trajectoire.

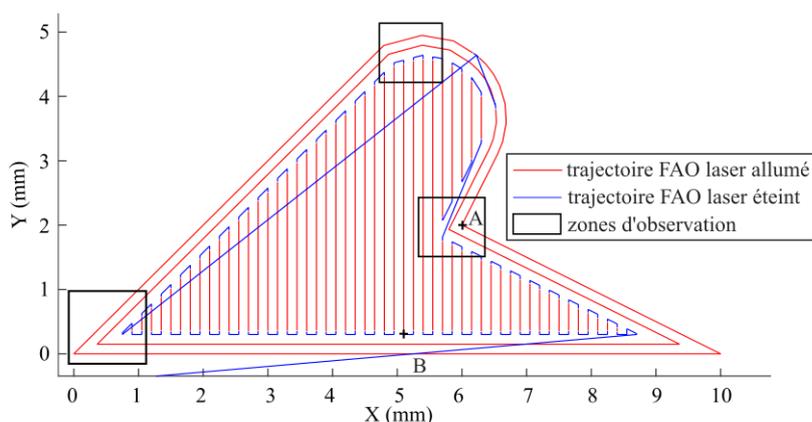


Figure 3: Trajectoire FAO de la gravure d'essais

Les essais de gravures sont réalisés avec la machine industrielle de fabrication additive FormUp 350. Pour chaque essai, les consignes de la CN (trajectoire FAO discrétisée) et les positions angulaires des miroirs (trajectoire effective) sont enregistrées à une fréquence de 93,75 kHz. Pour faciliter la compréhension, ces mesures sont représentées dans l'espace des tâches (en coordonnées x, y du spot laser dans le plan de travail) en utilisant le modèle géométrique direct de la machine (Godineau, 2021). Les gravures sont ensuite observées grâce à un système de mesure 3D optique à variation de focale.

La campagne expérimentale est séparée en trois essais distincts le premier a pour objectif de mettre en évidence uniquement l'effet du filtrage, le suivant l'effet de l'ajout de délais et le dernier l'ajout de segments laser éteint en utilisant la stratégie « skywriting ».

- L'essai n°1 est un essai de gravure de référence avec le jeu de paramètres nominaux présenté précédemment (vitesse, puissance, trajectoire).
- L'essai n°2 utilise les mêmes paramètres qu'au cours de l'essai n°1 en ajoutant des délais. La valeur de ces délais est fixée à  $500 \mu\text{s}$  entre deux segments laser allumés,  $400 \mu\text{s}$  entre les segments laser allumé et laser éteint et  $300 \mu\text{s}$  entre les segments laser éteint et laser allumé. Ces délais sont différents et la somme de deux d'entre eux n'est pas égale au troisième. Cela les rend facilement identifiables sur les mesures.
- L'essai n°3, utilise les mêmes paramètres que pour l'essai n°1, mais en ajoutant au début et à la fin de chaque succession de segment laser allumé des segments laser éteint de  $300 \mu\text{s}$ .

Les observations sont ciblées sur les zones de la pièce repérées où l'on trouve des changements de direction dans la trajectoire. Les critères étudiés pour chaque essai sont :

la vitesse de la trajectoire effective, l'écart au contour et la répartition surfacique d'énergie apportée sur la surface.

### 3 Résultats et discussions

#### 3.1 Effets du filtrage de la CN (essai n°1)

Les Figure 4a et Figure 4b montrent les gravures de l'essai de référence (essai n°1). Des arrondissements locaux sont constatés au niveau des discontinuités en tangence de la trajectoire FAO (segments rouges et bleus). Ces écarts géométriques entre la trajectoire FAO discrétisée et la trajectoire effective, engendrés principalement par le filtrage, sont de 24  $\mu\text{m}$  au niveau du point A et de 38  $\mu\text{m}$  au niveau du point B selon la distance de Hausdorff.

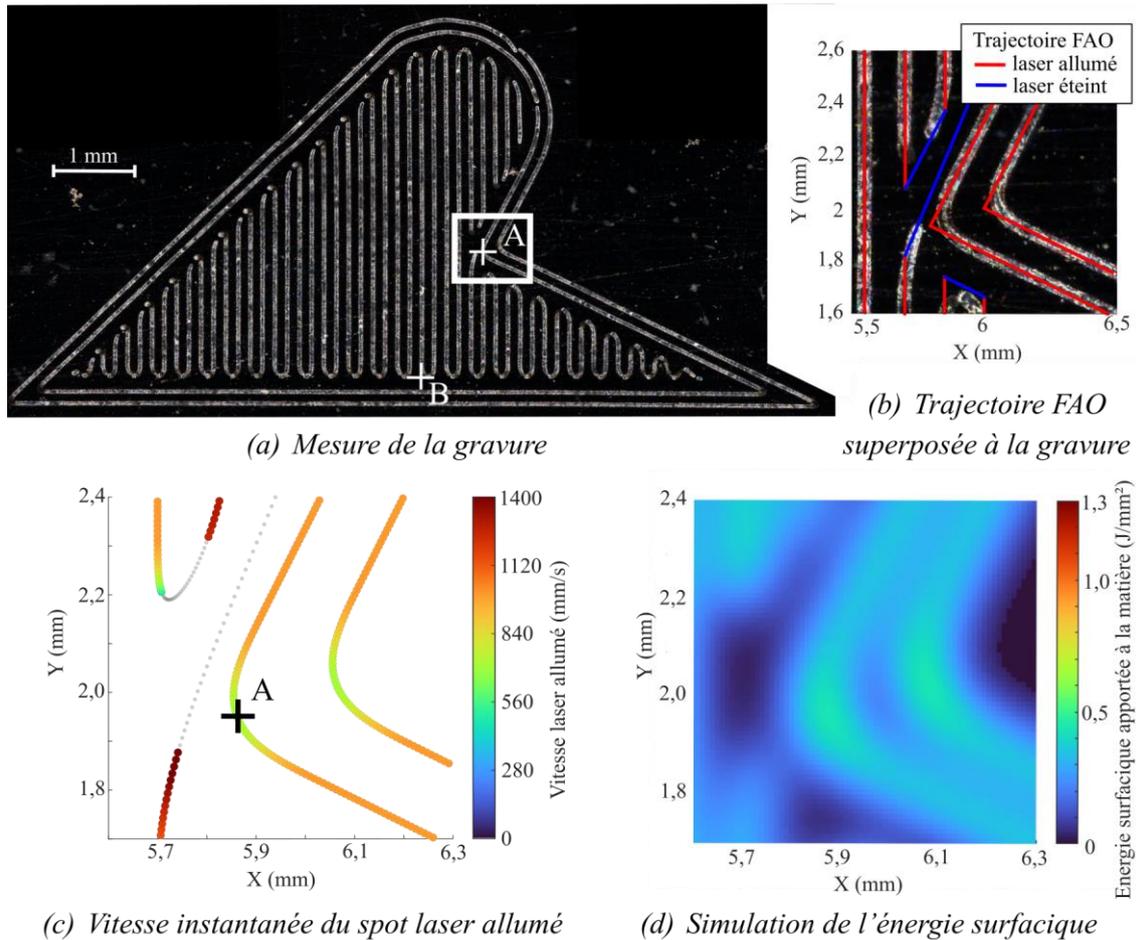


Figure 4: Mesure et simulation pour l'essai de référence (essai n°1)

La vitesse effective du laser reportée en chaque point de la trajectoire réelle montre l'importance des ralentissements (Figure 4c). Ils apparaissent sur chaque portion de la trajectoire présentant une forte courbure. Des accélérations sont aussi relevées aux transitions entre les segments laser allumé et laser éteint dues à la différence de vitesse programmée entre ces deux types de trajets. La Figure 5 compare la vitesse effective du spot laser à la vitesse de consigne. Au niveau du point A, une réduction de vitesse de près de 65% est observée. De même au point B le changement de direction du spot laser amène un ralentissement similaire, cependant la vitesse commandée laser éteint étant supérieure à la vitesse laser allumé une vitesse effective supérieure à la vitesse commandée est observée durant la phase d'accélération du spot. La réduction de vitesse atteint au

maximum 80% dans certaines zones de la pièce. La durée totale de gravure pour cet essai de référence est de 176 ms.

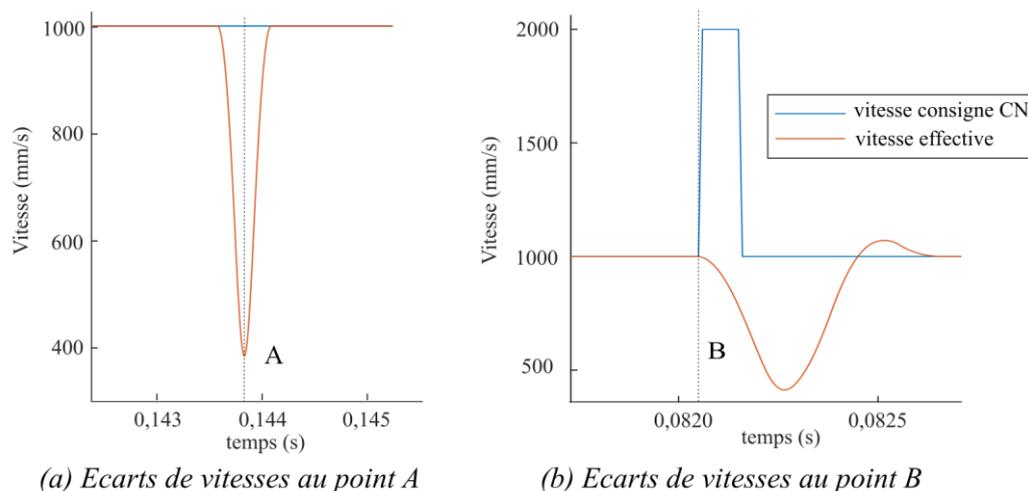


Figure 5: Vitesse consigne et vitesse effective au cours de l'essai 1

La Figure 4d présente une simulation de l'énergie surfacique apportée au plan de travail en fonction de la trajectoire et de la vitesse effective du spot laser, ainsi que de la puissance du faisceau laser. Cette simulation, met en évidence les variations énergétiques surfaciques locales qui sont induites par le filtrage. Les chutes de vitesse locales engendrent des accumulations d'énergie apportée sur la surface. Pour les gravures réalisées, sur la Figure 4, un élargissement de la marque suite au passage du laser est visible. Une telle accumulation d'énergie dans un contexte de fusion de poudre pourrait déstabiliser le bain de fusion et faire apparaître l'effet « keyhole ». Par ailleurs, des zones où l'énergie apportée est bien inférieure (zones quasi noires) sont observables. Ce manque local d'énergie est cette fois dû à la combinaison spatiale de plusieurs écarts géométriques importants. De telles zones apparaissent car les générateurs de trajectoire FAO ne tiennent actuellement pas compte du filtrage réalisé par la CN.

### 3.2 Effets de l'ajout de délais (essai n°2)

Pour l'essai n°2, des mesures et simulations similaires sont effectuées et représentées sur la Figure 6. Comparé à l'essai n°1, la trajectoire effective du laser suit, comme attendu, parfaitement la trajectoire consigne. Cependant un fort élargissement local de la gravure est clairement observable à la transition entre chaque segment (Figure 6a et 6b). De grands ralentissements apparaissent aux transitions entre deux segments consécutifs jusqu'à atteindre une vitesse nulle en certains points, comme au point B (Figure 6c). Cette chute de vitesse augmente localement la densité énergétique sur la surface (Figure 6d). La densité maximale d'énergie est en certains endroits multipliée par un facteur 3 comparativement à l'essai n°1. En synthèse, pour un filtrage donné, mettre un délai local permet au spot laser de converger spatialement vers le point consigne qui reste fixe sur ce laps de temps. En contrepartie la vitesse de lasage est fortement réduite et l'énergie surfacique apportée à la matière augmente. Le cumul de ces délais ajoutés a également pour conséquence directe d'allonger la durée de fabrication. Sur cet essai n°2, la durée de la gravure passe à 232 ms ce qui représente une augmentation de plus de 30% par rapport à l'essai précédent.

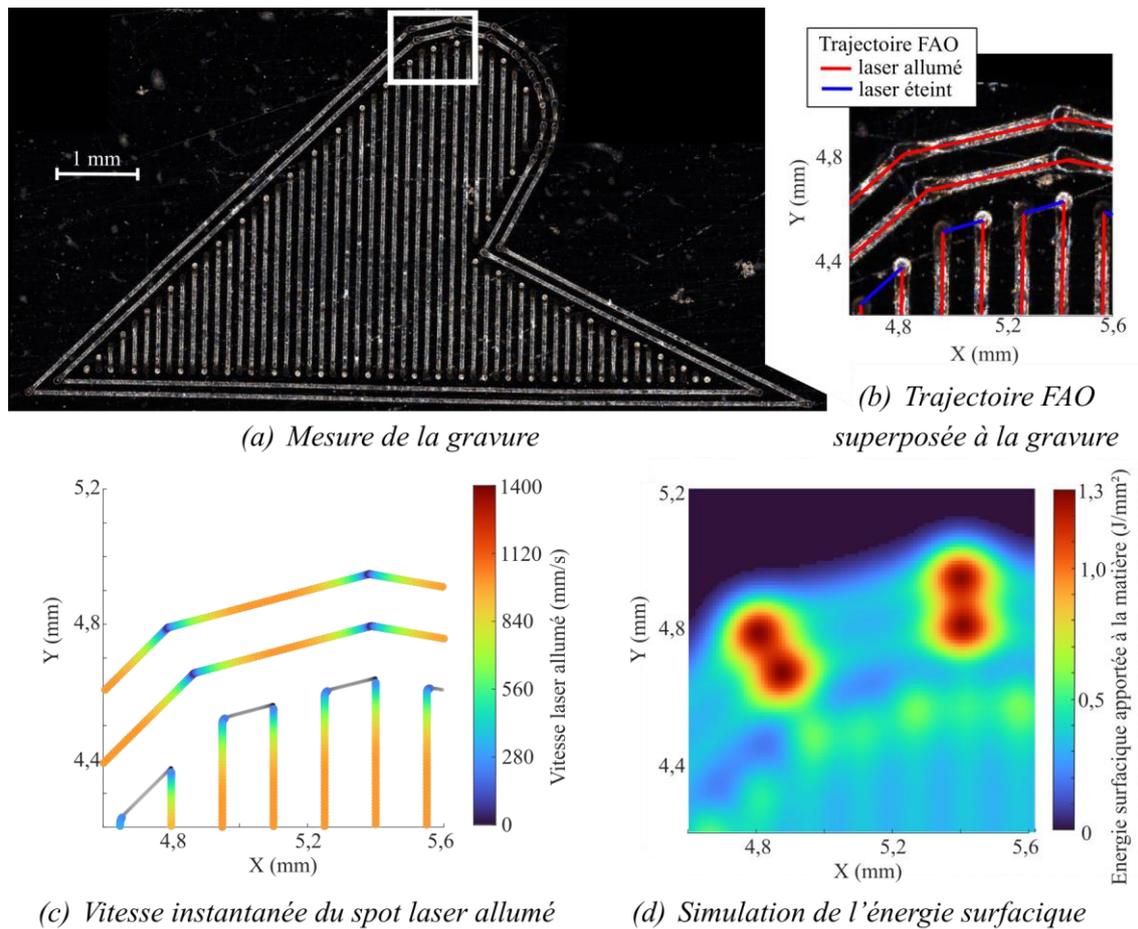


Figure 6: Mesure et simulation pour l'essai avec délais (essai n°2)

### 3.3 Effets de la mise en place d'une stratégie de « skywriting » (essai n°3)

La stratégie de « skywriting » mise en place a pour objectif de résoudre les problèmes géométriques et énergétiques mentionnés précédemment en découplant la synchronisation du laser des zones de ralentissement de la vitesse effective. La trajectoire FAO de l'essai n°3 a pour base celle de l'essai de référence avec en plus au début et à la fin de chaque trajet laser allumé l'insertion de segments tangents, parcourus laser éteint (Figure 7b).

Les contours sont vus comme une succession de segments laser allumé et donc que l'ajout des vecteurs laser éteint se fait uniquement au début et à la fin du contour. C'est pourquoi les résultats sur ces contours sont identiques à ceux de l'essai n°1. Les écarts relevés sur la trajectoire gravée sont très présents, on obtient également les mêmes écarts au contour que pour l'essai n°1 et des baisses de vitesse allant jusqu'à 80% entre les segments lasés en continu (Figure 7a et 7b). Par contre, dans la zone de remplissage où les segments ont été ajoutés (Figure 7c), les écarts géométriques et chutes de vitesse sont toujours présents, mais décalés sur les portions de trajets laser éteint. L'ajout de segments tangents avant et après chaque succession de segments gravés permet aux actionneurs de ne pas avoir à décélérer sur les trajets laser allumé. La vitesse de balayage est ainsi plus uniforme et proche de la valeur programmée. La simulation d'énergie déposée confirme une répartition plus homogène que dans les essais précédents dans les régions entre remplissage et contour (Figure 7d).

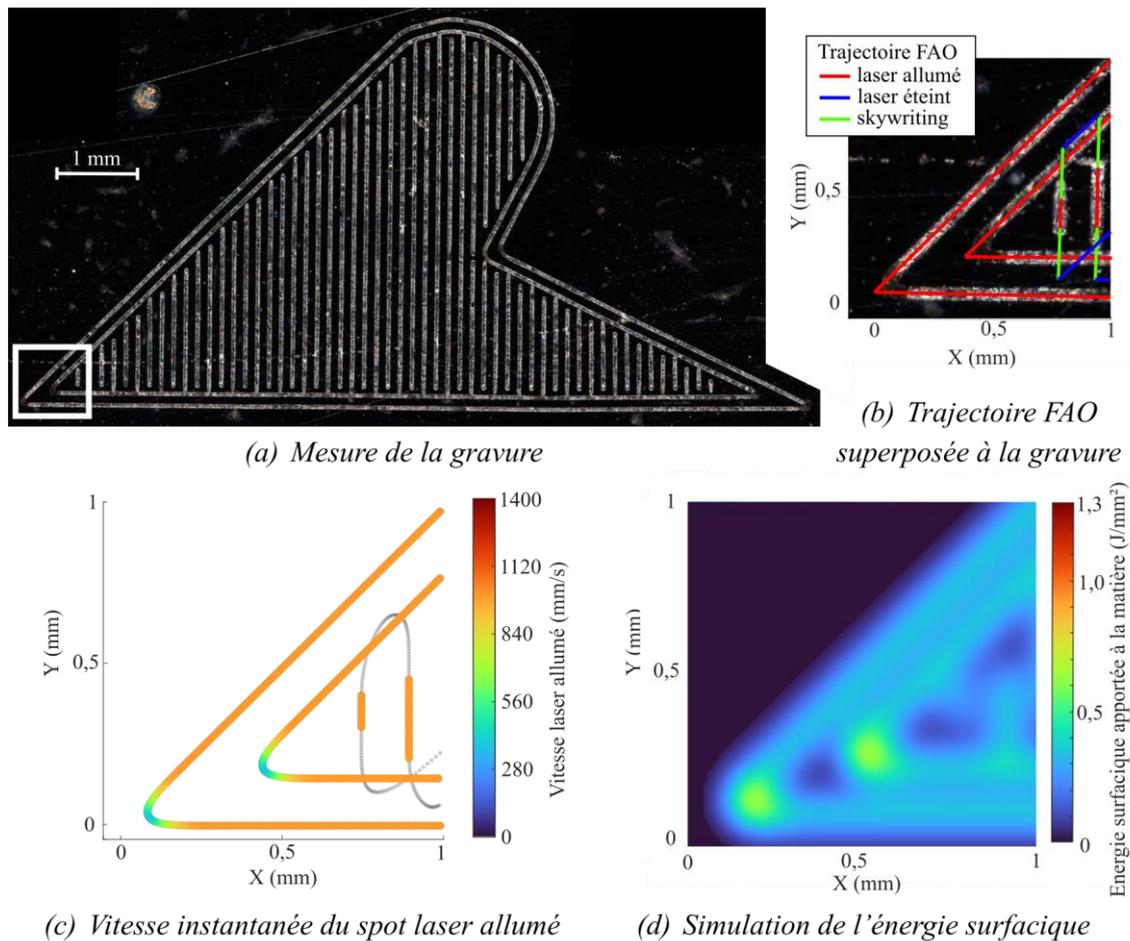


Figure 7: Mesure et simulation pour l'essai avec « skywriting » (essai n°3)

D'un point de vue temporel, les trajets supplémentaires que doit effectuer le laser ont pour effet d'allonger la durée de fabrication. Pour l'essai n°3, la durée de la gravure passe à 212 ms ce qui représente une augmentation de plus de 20% par rapport à l'essai n°1.

#### 4 Conclusion

Cet article apporte un éclairage sur le fonctionnement de la CN et sur des traitements implémentés sur les machines industrielles de fabrication additive PBF-LB. L'impact de plusieurs paramètres « avancés » a été étudié grâce à des essais de gravure et des simulations énergétiques. Les solutions mises en place pour compenser les défauts de répartition énergétique restent très limitées et ne permettent pas encore de maîtriser suffisamment l'homogénéité de l'énergie sur une couche qui est pourtant essentielle pour garantir des propriétés mécaniques et structurelles des pièces. Pour améliorer l'exécution des trajectoires, il est nécessaire de développer des stratégies locales de commande adaptées, qui tiennent compte des aspects thermiques et énergétiques du procédé tout en ne négligeant pas les contraintes dynamiques imposées par les actionneurs.

Le contrôle des différents paramètres technologiques de la machine ne semble possible à ce jour que dans le développement d'une commande numérique ouverte en fabrication additive. La mise en place de cette CN ouverte permettrait par exemple d'adapter les trajectoires et les consignes des actionneurs de la machine (source laser et galvanomètres) en temps réel avec pour objectif la maîtrise de la qualité des pièces fabriquées.

## Remerciements

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet ORACLE et est soutenu par une subvention de l'Agence Nationale de la Recherche ([ANR-22-CE10-0003](#)).

## Références

- K. Ettaieb, K. Godineau, S. Lavernhe, et C. Tournier (2022) *Offline laser power modulation in LPBF additive manufacturing including kinematic and technological constraints*, *Rapid Prototyping Journal*, vol 29, pp.80-91
- K. Godineau, S. Lavernhe, et C. Tournier (2019) *Influence of the opto-mechanical chain on the energy provided by the laser spot to the material in laser powder bed fusion processes*, *EUSPEN Special Interest Group Meeting: Advancing Precision in Additive Manufacturing*, Nantes, France
- K. Godineau, S. Lavernhe, et C. Tournier (2021) *Influence of the CNC Behaviour on the Laser Spot Trajectory in LPBF Process*, *Special Interest Group meeting between EUSPEN and ASPE Advancing Precision in Additive Manufacturing*, St Gallen, Suisse
- J. Huang, Q. Qin, J. Wang, et H. Fang (2018) *Two Dimensional Laser Galvanometer Scanning Technology for Additive Manufacturing*, *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, vol 6, pp.332-36
- W. E. King, H. D. Barth, et al. (2014) *Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing*, *Journal of Materials Processing Technology*, vol 214, pp.2915-2925
- G. V. de Leon Nope, L. I. Perez-Andrade et al. (2021) *Study of volumetric energy density limitations on the IN718 mesostructure and microstructure in laser powder bed fusion process*, *Journal of Manufacturing Processes*, vol 64, pp.1261-1272
- B. Liu, G. Fang, L. Lei, et W. Liu (2022) *Experimental and numerical exploration of defocusing in Laser Powder Bed Fusion (LPBF) as an effective processing parameter*, *Optics & Laser Technology*, vol 149
- X. Luo, J. Li, et M. Lucas (2017) *Galvanometer scanning technology for laser additive manufacturing*, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*
- A. Marques, Á. Cunha, et al. (2022) *Inconel 718 Produced by Laser Powder Bed Fusion: An Overview of the Influence of Processing Parameters on Microstructural and Mechanical Properties*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol 121, pp.5651-5675
- S. R. Narasimharaju, W. Zeng, et al. (2022) *A comprehensive review on laser powder bed fusion of steels: Processing, microstructure, defects and control methods, mechanical properties, current challenges and future trends*, *Journal of Manufacturing Processes*, vol 75, pp.375-414
- U. S. Bertoli, A. J. Wolfer, et al. (2017) *On the Limitations of Volumetric Energy Density as a Design Parameter for Selective Laser Melting*, *Materials & Design*, vol 113, pp.331-340
- S. Tajima, B. Sencer, et E. Shamoto (2018), *Accurate interpolation of machining tool-paths based on FIR filtering*, *Precision Engineering*, vol 52, pp.332-344
- H. C. Taylor, et R. B. Wicker (2022) *Impacts of microsecond control in laser powder bed fusion processing*, *Additive Manufacturing*, vol 60,
- H. Yeung, B. Lane, et al. (2017) *Continuous Laser Scan Strategy for Faster Build Speeds in Laser Powder Bed Fusion System*, *Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Texas
- B. Zhang, Y. Li, et Q. Bai (2017) *Defect Formation Mechanisms in Selective Laser Melting: A Review*, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol 30, pp.515-527