



**HAL**  
open science

# Influence du comportement de la Commande Numérique sur la trajectoire du spot laser en fusion laser sur lit de poudre

Kevin Godineau, Sylvain Lavernhe, Christophe Tournier

## ► To cite this version:

Kevin Godineau, Sylvain Lavernhe, Christophe Tournier. Influence du comportement de la Commande Numérique sur la trajectoire du spot laser en fusion laser sur lit de poudre. Conference Manufacturing21, Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay [ENS Paris Saclay], Oct 2022, Gif Sur Yvette, France. hal-04011651

**HAL Id: hal-04011651**

**<https://hal.science/hal-04011651>**

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.



# Influence du comportement de la Commande Numérique sur la trajectoire du spot laser en fusion laser sur lit de poudre

Kevin GODINEAU<sup>(a)</sup>, Sylvain LAVERNHE<sup>(a)</sup>, Christophe TOURNIER<sup>(a)</sup>

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

*Mail : [kevin.godineau@ens-paris-saclay.fr](mailto:kevin.godineau@ens-paris-saclay.fr)*

**Résumé :** La maîtrise de la qualité des pièces produites en fabrication additive par fusion laser sur lit de poudre (LPBF) dépend de la compréhension des phénomènes physiques intervenant dans le procédé. En LPBF, la trajectoire effective du spot laser est rarement étudiée et les travaux existants se concentrent principalement sur le choix de la stratégie de balayage et des paramètres du procédé. Cependant, la trajectoire de balayage générée en FAO est modifiée dans la machine par la commande numérique afin de générer des consignes admissibles pour les actionneurs. Cette modification engendre des écarts à la trajectoire de consigne et des diminutions importantes de la vitesse du spot laser. Dans le but d'identifier le comportement de la CN, un banc d'essai réplique d'une machine industrielle a été développé. Ce banc permet d'acquérir les consignes envoyées aux actionneurs et leurs positions réelles à une fréquence de 100 kHz, ainsi que l'énergie déposée par le spot laser au niveau du plan de mise en couche. L'analyse de ces données montre que les traitements effectués dans la CN sont basés sur une méthode de filtrage qui, dans certains cas, peut générer une déviation de la trajectoire de plus de 100  $\mu\text{m}$ . Enfin, un modèle a été développé pour évaluer la densité d'énergie apportée par le laser sur la poudre en intégrant la dynamique des actionneurs, le comportement de la CN ainsi que la chaîne optique du système. Des essais expérimentaux ont été réalisés pour valider les simulations issues du modèle proposé.

**Mots clés :** LPBF, Commande Numérique, Trajectoire, Filtrage, Énergie.

## 1 Introduction

La maîtrise de la trajectoire effective du spot laser joue un rôle essentiel en fabrication additive LPBF. Effectivement, le mouvement du spot laser sur la poudre permet de

répartir l'énergie nécessaire à la fusion. Les travaux explicités dans cet article mettent en évidence l'impact conséquent du comportement de la commande numérique sur la trajectoire effective du spot laser. La commande numérique réalise les opérations suivantes (aussi représenté dans la Figure 1) :

1. Discrétisation - interpoler les trajectoires générées par le trancheur  $X^{cons}$  en une succession de positions du spot laser  $X^{inter}$ .
2. Transformé géométrique inverse (TGI) - convertir les positions  $X^{inter}$  en position des actionneurs  $Q^{inter}$ .
3. Interpolation géométrique et temporelle - modifier localement les positions  $Q^{inter}$  pour produire des consignes  $Q^{filt2}$  qui respectent les contraintes cinématiques des actionneurs.

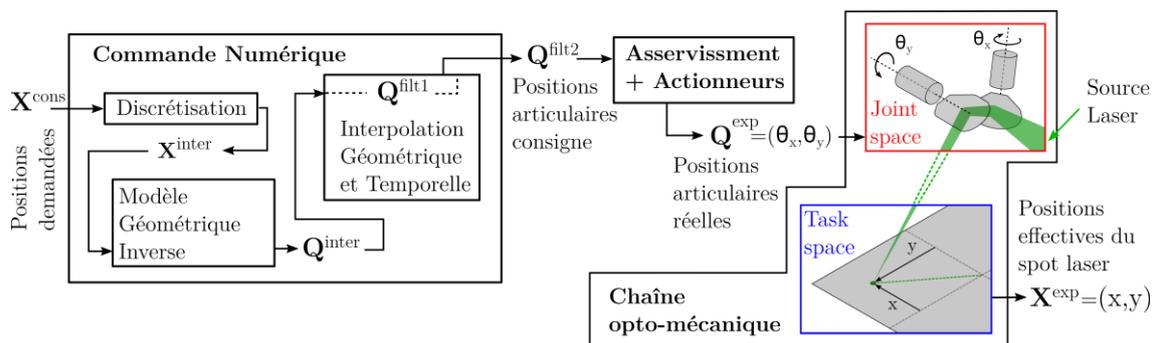


Figure 1 : Architecture de la commande numérique et du banc d'essai développé.

L'étape 3 est nécessaire, car les trajectoires issues du trancheur ne sont pas physiquement réalisables, elles supposent des accélérations infinies au niveau des actionneurs. Ces 3 étapes engendrent des modifications locales de la vitesse et de la trajectoire effective.

Cet aspect n'est jamais pris en compte dans les simulations thermiques et est pourtant critique, car il engendre des dépôts d'énergie plus importants à certains endroits de la pièce. En usinage et en robotique, les traitements effectués par la commande numérique sont connus et font l'objet de nombreux travaux de recherche. Ces travaux sont axés sur l'optimisation des consignes envoyées aux actionneurs pour maîtriser la trajectoire effective du système au regard des limites cinématiques des actionneurs (Tajima, 2018). En fabrication additive LPBF les travaux centrés sur l'interpolation temporelle des trajectoires sont très peu nombreux. L'article (Wienken, 2016) met en avant les développements de l'entreprise SCANLAB et décrit succinctement le fonctionnement de la structure de contrôle des actionneurs. Les trajectoires initialement à vitesse limitée sont traitées pour être transformées en trajectoire à accélération limitée.

Une équipe de recherche du NIST ("National Institute of Standards and Technology") travaille également sur ces aspects. Pour cela, ils ont développé une réplique d'une machine de fabrication additive sur lit de poudre (Lane, 2016). En utilisant cette plateforme, ils ont analysé les lois de commandes utilisées par le contrôleur industriel (lois à vitesse limitée) et ont implémenté des lois de mouvement à accélération limitée (Yeung, 2016) et à jerk limité (Yeung, 2018). L'intégration de ces lois permet d'obtenir des consignes qui sollicitent moins les actionneurs et sont donc mieux respectées par le système.

Les travaux effectués dans cet article concernent l'étude et la caractérisation d'une commande numérique industrielle existante. L'analyse de ce système permet de mettre en évidence les limites de celui-ci et donc souligner les améliorations possibles.

Cet article est organisé de la manière suivante : La section 2 est dédiée à la mise en place d'un banc d'essai. L'analyse des différents signaux permet dans la section 3 d'identifier le comportement de la commande numérique du système et son impact sur les trajectoires effectives. Ces connaissances sont utilisées afin de mettre en place un simulateur d'énergie apporté à la matière. Ce modèle est présenté succinctement et validé expérimentalement dans la section 4.

## 2 Mise en place d'un banc d'essai

Dans cette section, le banc d'essai développé est présenté et différents signaux sont analysés pour identifier les solutions implémentées dans la commande numérique industrielle.

### 2.1 Description de l'architecture du banc d'essai

L'architecture de la plateforme développée est représentée dans la figure 1. Cette plateforme intègre une chaîne industrielle actuellement utilisée dans plusieurs machines de fabrication additive LPBF. Les différents signaux utilisés dans cet article sont positionnés sur la Figure 1. Les signaux qui n'ont pas déjà été décrits sont explicités dans la liste suivante :

1.  $Q^{filt1}$  correspond à des consignes internes de l'étape d'interpolation temporelle et géométrique ;
2.  $Q^{filt2}$  correspond aux consignes de position articulaire envoyées dans l'asservissement ;
3.  $Q^{exp}$  et  $X^{exp}$  représente respectivement les positions articulaires des actionneurs et la position réelle du spot laser dans le plan de travail.

Le banc d'essai est complété d'une caméra afin d'acquérir l'énergie déposée sur la surface du plan de travail. Pour simplifier les mesures et minimiser les sources d'erreur, le faisceau laser tire directement sur la matrice CCD. Cela permet d'observer la trace du spot laser. L'article (Godineau, 2019) explicite la solution technologique employée.

### 2.2 Analyse des données

Pour mieux comprendre les opérations effectuées dans la commande numérique, les signaux de positions articulaires  $Q^{inter}$ ,  $Q^{filt1}$  et  $Q^{filt2}$  sont dérivés afin d'observer les vitesses angulaires ainsi que les accélérations angulaires.

La Figure 2 présente les accélérations angulaires des différents signaux. Pour des raisons de lisibilité, les signaux  $Q^{inter}$  et  $Q^{exp}$  ne sont pas affichés. La consigne en entrée correspond à un saut de vitesse de l'axe x. Le signal  $Q^{filt1}$  représente un créneau d'accélération de durée  $T_1 = 260 \mu$ . Le signal  $Q^{filt2}$  représente un trapèze d'accélération dont la durée de la phase montante et descendante est identique et égale à  $T_2 = 125 \mu s$ . Le signal  $Q^{filt2}$  correspond donc à un signal à jerk limité (trapèze d'accélération).

Les observations effectuées sur cet essai ont été répétées pour d'autres consignes et sur les deux actionneurs. Les conclusions sur les temps des phases de montées en vitesse et de montées en accélération sont identiques. Idem pour les phases de descente. L'étude de

la littérature permet de montrer que les traitements effectués par la commande numérique sont basés sur une solution par filtrage FIR de type "porte" (Biagiotti, 2012). La solution employée est constituée de deux filtres portes successifs de temps  $T_1$  et  $T_2$ . Ces deux filtres de durée fixée permettent de limiter l'accélération et le jerk maximal.

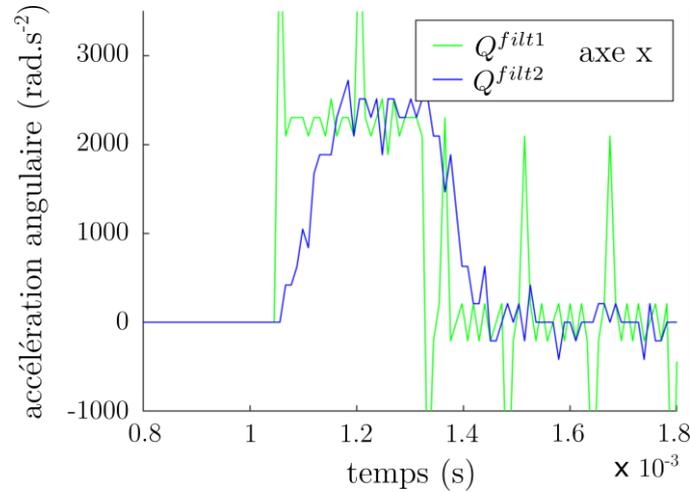


Figure 2 : Mesure de l'accélération angulaire de l'actionneur  $x$ .

Les observations effectuées sur cet essai ont été répétées pour d'autres consignes et sur les deux actionneurs. Les conclusions sur les temps des phases de montées en vitesse et de montées en accélération sont identiques. Idem pour les phases de descente. L'étude de la littérature permet de montrer que les traitements effectués par la commande numérique sont basés sur une solution par filtrage FIR de type "porte" (Biagiotti, 2012). La solution employée est constituée de deux filtres portes successifs de temps  $T_1$  et  $T_2$ . Ces deux filtres de durée fixée permettent de limiter l'accélération et le jerk maximal.

Une saturation en vitesse est également effectuée entre les signaux  $Q^{filt1}$  et  $Q^{filt2}$  lorsque la consigne dépasse la valeur de vitesse maximale de  $25 \text{ rad.s}^{-1}$ . Dans ces travaux, de telles vitesses angulaires ne sont jamais demandées aux actionneurs. Effectivement, solliciter un seul actionneur (galvanomètre) à cette vitesse angulaire reviendrait à demander une vitesse du spot laser dans l'espace des tâches d'approximativement  $35 \text{ m.s}^{-1}$ .

### 3 Analyse du comportement de la CN

Dans cette section l'influence du filtrage sur la vitesse et l'écart au contour est mise en évidence. Une analyse de la dynamique du système est également effectuée. Enfin, tous ces développements sont validés expérimentalement.

#### 3.1 Hypothèses et paramétrage

Pour simplifier la compréhension, dans la suite des travaux nous considérerons que les filtres sont appliqués sur les consignes  $X^{inter}$  dans l'espace des tâches. L'impact de la TGI sur l'opération de filtrage est donc considéré comme négligeable. Cette hypothèse a été validée grâce à des simulations. Sur l'ensemble de la plage angulaire des actionneurs et pour des vitesses inférieures à  $10 \text{ m.s}^{-1}$  cette hypothèse engendre des écarts qui n'excèdent pas  $10^{-8} \text{ rad}$ . Cette erreur retranscrite sur le plan de travail est inférieure à  $0.1 \mu\text{m}$  et donc considérée comme négligeable.

Enfin, pour simplifier l'étude on s'intéresse à la réalisation d'une trajectoire composée de deux segments successifs (Figure 3). La trajectoire consigne est représenté en noir et la trajectoire filtrée en bleu.

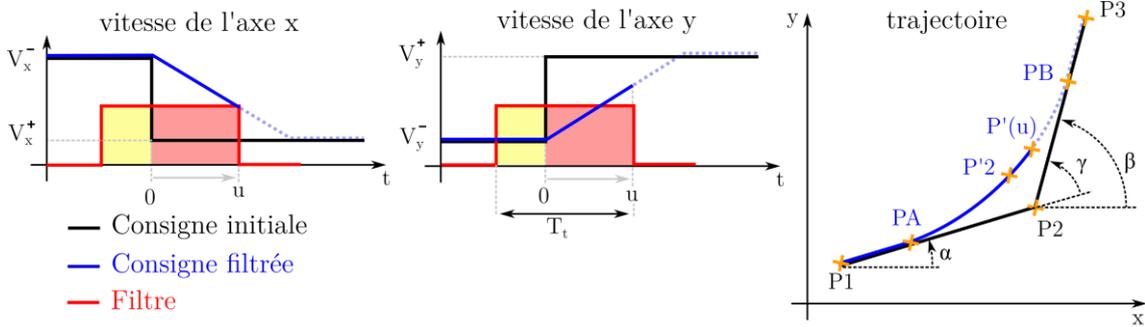


Figure 3 : Paramétrage d'une opération de filtrage. Exemple avec un filtre porte.

1. La vitesse programmée de la trajectoire est nommée  $V_{eff}$ .
2. La vitesse de l'axe  $x$  est notée  $V_x^-$  sur le segment  $(P1, P2)$  et  $V_x^+$  pour le segment  $(P2, P3)$  (Idem pour l'axe  $y$ ).
3. L'angle orienté entre les deux segments est noté  $\gamma$ .
4. Le temps d'interaction entre le filtre et le second segment de la trajectoire est noté  $u$ .
5. La fonction  $a(u)$  correspond à l'aire algébrique du filtre pendant le temps  $u$  (aire de la surface rouge sur la Figure 3).
6. Le filtre utilisé à une durée  $T_t$ , est symétrique et d'aire unitaire  $a(T_t) = 1$ .
7. La fonction  $A(u)$  correspond à l'intégrale de l'aire algébrique du filtre pendant le temps  $u$ .
8. Lorsque  $u = 0$  le filtre n'a pas d'impact sur la géométrie de la trajectoire. Le point courant  $P'(u)$  est situé en  $PA$ .
9. Lorsque  $u = T_t$  le filtre n'a plus d'impact sur la géométrie de la trajectoire. Le point courant  $P'(u)$  est situé en  $PB$ .

### 3.2 Influence du filtrage sur la vitesse

Dans un premier temps, la vitesse de la trajectoire filtrée est étudiée. La connaissance de cette vitesse est importante, car une diminution de celle-ci engendre une augmentation de l'énergie déposée si la puissance du laser est constante. La vitesse de l'axe  $x$  est exprimée dans l'équation (Eq.1) (idem pour l'axe  $y$ ).

$$Vf_x(u) = (1 - a(u))V_x^- + a(u)V_x^+ \quad (1)$$

La norme des vitesses  $Vf_x(u)$  et  $Vf_y(u)$  permet de calculer la vitesse tangentielle de la trajectoire filtrée. Cette vitesse est écrite dans l'équation (Eq.2).

$$Vf(u) = V_{eff} \sqrt{(1 + 2 \cdot a(u)(1 - a(u)(\cos(\gamma) - 1))} \quad (2)$$

Pour un filtre symétrique d'aire unitaire, le minimum de cette fonction est obtenu en  $u = T_t/2$ . La vitesse minimale de la trajectoire filtrée est exprimée dans l'équation (Eq.3).

$$Vf\left(u = \frac{T_t}{2}\right) = Vf_{min} = V_{eff} \left| \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \right| \quad (3)$$

Comme le montre l'équation (Eq.3) la vitesse minimale de la trajectoire filtrée est indépendante du filtre utilisé. Cette vitesse minimale dépend uniquement de la vitesse tangentielle et de l'angle entre les deux segments.  $Vf_{min} = V_{eff}$  pour  $\gamma = 0 \text{ deg}$  et  $Vf_{min} = 0$  pour  $\gamma = 180 \text{ deg}$ . Cette équation est vérifiée expérimentalement dans la partie 3.5.

### 3.3 Influence du filtrage sur l'erreur au contour

Il est également important d'étudier la géométrie de la trajectoire filtrée. Effectivement, cette géométrie a un impact sur la trajectoire réalisée et donc sur la géométrie de la pièce. Pour étudier cela, le critère d'écart au contour  $e_c$  est utilisé. Ce critère défini en chaque point de la trajectoire consigne la distance minimale entre l'ensemble de la trajectoire filtrée et ce point.

La trajectoire filtrée  $P'(u)$  représentée dans la Figure 3 est calculée en partant de la position du point  $PA$  et en intégrant la vitesse filtrée obtenue dans l'équation (Eq.1). Après simplification on obtient l'équation (Eq.4) qui donne la distance entre la trajectoire filtrée  $P'(u)$  et le point  $P2$ .

$$\|P'(u) - P2\| = V_{eff} \sqrt{\left(u - \frac{T_t}{2}\right)^2 + 2A(u) \left(u - \frac{T_t}{2} - A(u)\right) (\cos(\gamma - 1))} \quad (4)$$

Si le filtre est positif alors les fonctions  $a(u)$  et  $A(u)$  sont monotone (croissante) et positives. Sous cette condition, l'écart au contour maximal est obtenu en  $u = T_t/2$ . L'écart au contour correspond alors à la distance entre  $P'2$  et  $P2$ . Le point  $P'2$  est alors situé sur la bissectrice des deux segments consécutifs. L'équation précédente peut ainsi être simplifiée afin d'obtenir l'équation (Eq.5).

$$e_c = 2V_{eff} A\left(\frac{T_t}{2}\right) \left| \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \right| \quad (5)$$

Cette équation décrit l'écart au contour comme une fonction de l'intégrale de l'aire du filtre, de la vitesse de la trajectoire programmée et de l'angle orienté entre deux segments consécutifs. L'équation est valable pour tous les filtres symétriques positifs d'aire unitaire. Lorsque l'on applique l'équation (Eq.5) à un filtre de type trapèze (combinaison de deux filtres porte de durées  $T_1$  et  $T_2$  avec  $T_1 > T_2$ ) l'équation devient :

$$e_c = V_{eff} \frac{T_2^2 + 3T_1^2}{12T_1} \left| \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \right| \quad (6)$$

L'équation (Eq.6) est vérifiée expérimentalement dans la partie 3.5.

### 3.4 Identification du comportement dynamique du système

Maintenant que cette architecture est connue, il est possible d'identifier le comportement dynamique de l'ensemble asservissement plus actionneur. Pour cela, des consignes sinusoïdales sont envoyées sur chacun des axes.

La Figure 4 représente le ratio entre les amplitudes des signaux  $Q^{exp}$  et  $Q^{filter}$  à différentes fréquences. Cette figure traduit donc le comportement des actionneurs et de leurs structures d'asservissement. L'ensemble associé à l'actionneur y est moins dynamique, cela provient du fait que le miroir y a une inertie plus importante.

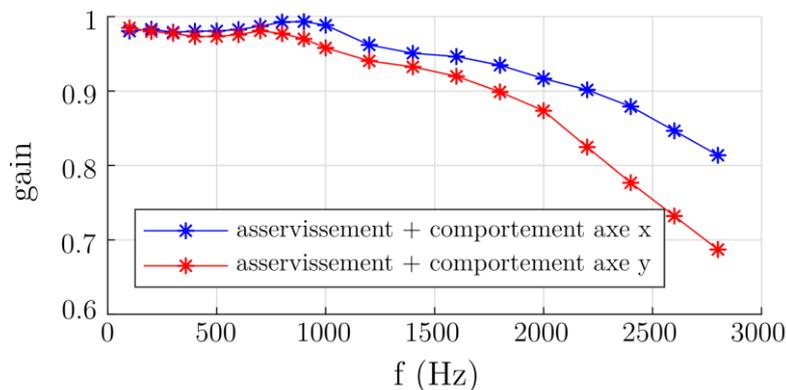


Figure 4 : Diagramme de Bode du comportement de l'ensemble (Asservissement + galvanomètre).

### 3.5 Validation expérimentale

Dans le but de confirmer les développements réalisés dans les sections 3.3 et 3.4 plusieurs trajectoires avec différentes vitesses et différents angles ont été réalisées. La Figure 5 montre une trajectoire consigne, la trajectoire filtrée correspondante et la trajectoire effective. Les Figures 5b et 5c montrent respectivement la vitesse tangentielle et l'erreur au contour.

Pour l'angle 1 ( $\gamma = 53,13 \text{ deg}$ ) les équations (Eq.3) et (Eq.6) prédisent un minimum de vitesse à  $1789 \text{ mm.s}^{-1}$  et une erreur au contour maximum de  $62 \mu\text{m}$ . Les résultats expérimentaux montrent que la vitesse minimale de la trajectoire filtrée est de  $1708 \text{ mm.s}^{-1}$  et que l'erreur au contour maximal est de  $62 \mu\text{m}$ . Pour l'angle 2 ( $\gamma = 108,43 \text{ deg}$ ) la vitesse théorique est de  $1170 \text{ mm.s}^{-1}$  et l'erreur au contour maximum de  $114 \mu\text{m}$ . Les mesures montrent que la vitesse minimale de la trajectoire est de  $1101 \text{ mm.s}^{-1}$  et que l'erreur au contour maximal est de  $109 \mu\text{m}$ . Les écarts entre la théorie et les mesures de vitesse sont principalement dus à des erreurs d'échantillonnage des consignes effectuées dans la commande numérique.

La trajectoire effective est très similaire à la trajectoire filtrée. Cela est dû d'une part aux stratégies d'asservissement des actionneurs qui sont très efficaces et d'autre part au filtrage de trajectoire qui permet de rendre les trajectoires réalisables.

En étudiant le filtrage plus en détail, les limites de la solution utilisée peuvent être montrées. Par exemple, les phases d'accélération et de décélération ont une durée toujours constante quelque soit la valeur de la vitesse consigne demandée. Les actionneurs ne sont donc pas utilisés au maximum de leur performance. Il est donc possible d'améliorer la

solution en adaptant la durée des filtres en fonction des vitesses consignes. Cette proposition permettrait de gagner du temps sans nécessairement perdre en qualité.

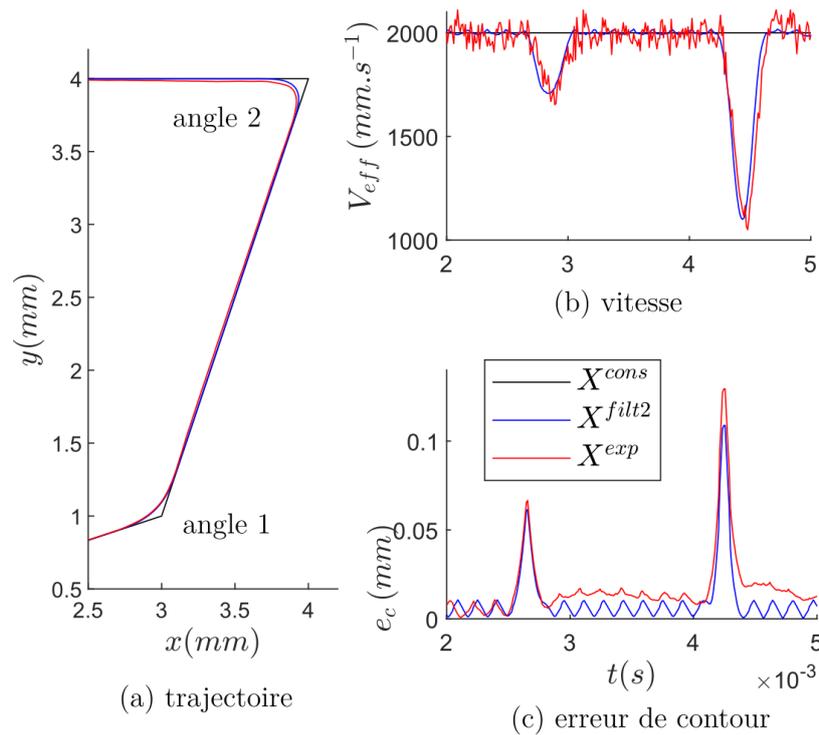


Figure 5 : Trajectoire réalisée à une vitesse programmée de  $V_{eff} = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

#### 4 Impact sur l'énergie apportée à la poudre

Maintenant que l'impact de la dynamique du système sur la trajectoire a été quantifié, il reste à ajouter le comportement énergétique de la source laser afin d'établir un simulateur permettant de modéliser le dépôt d'énergie sur la poudre.

La modélisation de la source laser ainsi que le protocole de mesure de l'énergie déposée sont décrits dans l'article (Godineau, 2019). Le simulateur développé tient compte :

1. du comportement de la commande numérique identifié dans les sections 2.2, 3.2 et 3.3 ;
2. du comportement dynamique des actionneurs ainsi que de l'asservissement identifié dans la section 3.4 ;
3. de la distribution d'énergie de la source laser qui dans ce papier est considérée comme gaussienne ;
4. de l'influence de la chaîne opto-mécanique sur l'énergie apportée par le spot laser sur la poudre (Godineau, 2019).

La Figure 6 représente l'énergie apportée à la poudre dans le cas d'une trajectoire à angle droit de vitesse programmé  $V_{eff} = 1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Le faisceau laser utilisé sur le banc d'essai est de très faible puissance 1  $mW$  afin de ne pas détériorer la matrice CCD. Enfin, pour des questions de lisibilité l'intensité est normalisée.

Les écarts géométriques à la trajectoire consigne sont bien conforme à ceux d'écrit par l'équation (6). La diminution de vitesse observée dans le coin engendre une accumulation d'énergie. Le simulateur est fidèle et permet de quantifier l'énergie apportée à la matière. Les écarts sur l'amplitude maximale sont de 5% et les différences entre le modèle et la

mesure provienne principalement de la forme du spot en entrée de la chaîne opto-mécanique. Expérimentalement, la distribution d'énergie de la source laser n'est pas parfaitement gaussienne alors que dans le modèle elle est considérée comment telle.

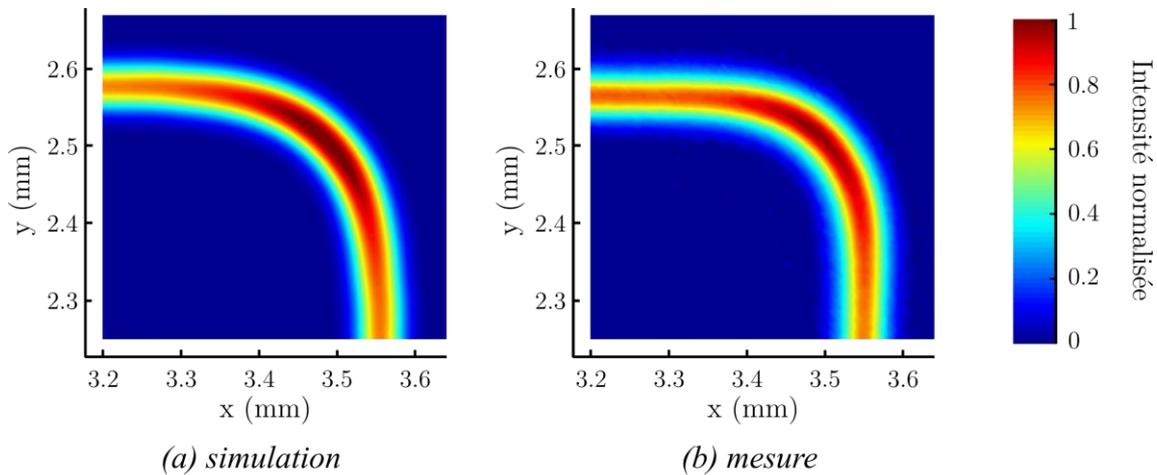


Figure 6 : Influence énergétique de l'interpolation sur une trajectoire composée de deux segments à angle droit pour une vitesse programmée de  $V_{eff} = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

## 5 Conclusion et perspectives

Un banc d'essai réplique d'une machine réelle a été développé dans le but d'étudier l'impact des traitements effectués par la commande numérique sur la trajectoire du spot laser. Des solutions de type filtrage ont été mises en évidence. Ces solutions provoquent des diminutions de vitesse ainsi que des écarts au contour à la trajectoire FAO important. L'identification du comportement de la machine a permis de développer un simulateur afin d'étudier l'énergie apportée à la matière.

Ces travaux peuvent permettre d'améliorer grandement les simulations thermiques en tenant compte de la trajectoire et de la vitesse effective du spot laser. Cette étude met également en évidence de nombreuses perspectives liées au développement de nouvelles stratégies de contrôle-commande. Par exemple, il semble pertinent de coupler la puissance du faisceau laser et la cinématique des trajectoires dans le but d'homogénéiser le dépôt d'énergie.

## Remerciements

Ce travail a été effectué dans le cadre du projet SOFIA et financé par Bpifrance

## Références

- S. Tajima, B. Sencer and E. Shamoto (2018) Accurate interpolation of machining tool-paths based on FIR filtering, *Precision Engineering*, vol. 52, pp. 332-344
- C. J. Wienken, A. Unterholzner and M. Breit (2016) Advanced galvo control enables efficient laser micro processing, *9th International Conference on Photonic Technologies LANE 2016*
- B. Lane and al. (2016) Design, Developments, and Results from the NIST Additive Manufacturing Metrology Testbed (AMMT), *Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium--An Additive Manufacturing Conference*, pp. 1145-1160
- H. Yeung, J. Neira, B. Lane, J. Fox and F. Lopez (2016) Laser Path Planning and Power Control Strategies for Powder Bed Fusion Systems, *Solid Freeform Fabrication Symposium*

- K. Yeung, B. Lane, M. Donmez, J. Fox and J. Neira (2018) Implementation of Advanced Laser Control Strategies for Powder Bed Fusion Systems, Procedia Manufacturing, vol. 26, pp. 871-879*
- K. Godineau, S. Lavernhe and 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*
- L. Biagiotti and C. Melchiorri (2012) FIR filters for online trajectory planning with time-and frequency-domain specifications, Control Engineering Practice, vol. 20, pp. 1385-1399*