

Évaluation de la qualité de la mise en couche pour le procédé de fusion laser sur lit de poudre

Virgile Batto, Emile Siboulet, Nicolas Muller, Yann Quinsat, Christophe Tournier

▶ **To cite this version:**

Virgile Batto, Emile Siboulet, Nicolas Muller, Yann Quinsat, Christophe Tournier. Évaluation de la qualité de la mise en couche pour le procédé de fusion laser sur lit de poudre. Conférence Manufacturing'21, Jun 2021, Angers, France. hal-03272573

HAL Id: hal-03272573
https://hal.science/hal-03272573

Submitted on 28 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.



Évaluation de la qualité de la mise en couche pour le procédé de fusion laser sur lit de poudre

Virgile BATTO, Émile SIBOULET, Nicolas MULLER
Yann QUINSAT*, Christophe TOURNIER
Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, LURPA, 91190, Gif-sur-Yvette, France

** Correspondant :* yann.quinsat@ens-paris-saclay.fr

Résumé : la fabrication par fusion laser sur lit de poudre (LPBF) est l'un des procédés de fabrication additive permettant l'obtention de pièces near net shapes très proches des spécifications attendues. L'un des problèmes rencontrés pour son industrialisation provient d'un manque de répétabilité qui peut provenir de l'imprécision du dispositif de mise en couche. Peu d'étude existe actuellement permettant de caractériser la qualité de la mise en couche lors du procédé d'impression alors que l'épaisseur de couche est un élément important dans le calcul de l'énergie à apporter pour maitriser le bain de fusion. Dans cette étude nous nous concentrons sur l'étude de la qualité de la mise en couche, plus particulièrement sur la mesure de l'écart de rectitude dans la direction d'étalement du lit de poudre. Pour cela, l'intégration d'un capteur confocal chromatique dans une machine LPBF a été réalisée. Positionné sur le chariot de mise en couche, la mesure d'une ligne sur le lit de poudre par ce capteur est ainsi rendue possible avant chaque opération de lasage. La mesure d'un étalon de planéité par ce système de mesure permet de mettre en évidence et d'évaluer l'erreur induite par le système de déplacement. Les essais effectués ont montré que cette erreur est d'un ordre inférieur à l'écart de rectitude recherché, validant ainsi le système de mesure. Les résultats de mesure sur le lit de poudre sont ensuite analysés et mettent en évidence l'influence de la géométrie du système de mise en couche utilisé. Ces résultats sont également comparés au défaut de forme du rouleau, obtenu sur une machine à mesurer tridimensionnelle Zeis Accura équipée d'un palpeur de scanning Vast XXT.

Mots clés : LPBF, mise en couche, mesure *in-situ,* écart de rectitude.

1 Introduction

La qualité de la mise en couche des poudres, en particulier l'uniformité de la surface déposée, est un facteur critique influençant la qualité des composants produits par les procédés de fabrication additive métallique sur lit de poudre, notamment la fusion par laser, la fusion par faisceau d'électrons et le jet de liant (Meier, 2019). En effet, pour les procédés de fusion par laser (LPBF), l'énergie à apporter pour effectuer et maîtriser la fusion dépend directement de l'épaisseur de couche. Cette maitrise est nécessaire afin de garantir les bonnes caractéristiques de la pièce produite ; par exemple la forme et la distribution des porosités dans le matériau produit dans les mêmes conditions opératoires (vitesse du spot laser et puissance laser) sont dépendantes de l'épaisseur de couche (figure 1).

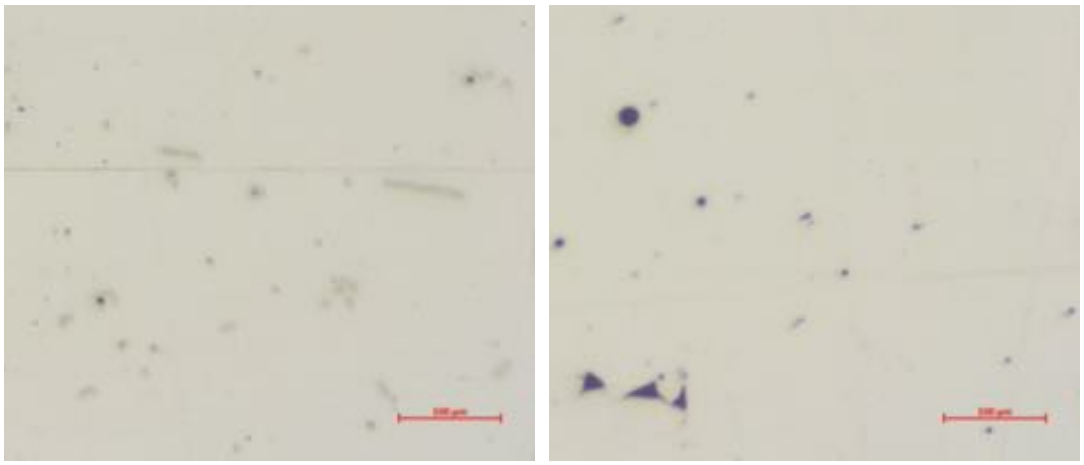


Figure 1 : Micrographie d'un échantillon en IN718 : à gauche une épaisseur de couche de 40 µm ; à droite une épaisseur de couche de 80 µm

Les travaux sur la qualité du lit de poudre dans la littérature portent essentiellement sur la surveillance de la phase de mise en couche (Foster, 2015) et la détection d'anomalie sur le lit de poudre avant fusion (Scime, 2020 et Dinh, 2021). Les systèmes de mesure utilisés sont à chaque fois des caméras qui permettent d'observer la zone de travail de la machine dans le domaine du visible.

Peu de travaux proposent de mesurer le lit de poudre dans l'enceinte de fabrication. Dans le cas du frittage laser de polymère, Southon *et al.* (Southon, 2018) démontrent la capacité d'un système à projection de franges à identifier un certain nombre de défauts après l'achèvement de chaque couche. La taille des défauts identifiés varie de quelques centaines de micromètres à quelques millimètres. L'analyse du lit de poudre a montré la capacité à quantifier les interactions entre la mise en couche et la consolidation d'une couche frittée. Cela permet une meilleure compréhension et un meilleur suivi du comportement dynamique au cours du processus. Chen *et al.* (Chen, 2020), étudient le procédé de mise en couche par le biais d'expériences et de simulations. La rugosité de surface de la couche de poudre est mesurée in situ dans le cadre d'expériences, avec l'intégration d'un capteur mesurant par triangulation laser. Néanmoins, cette étude est réalisée sur une distance assez courte (moins de 10 mm) et la qualité de la mesure n'est pas analysée.

Il existe deux méthodes principales pour l'étalement de la poudre : le raclage et le contre-roulage. Dans le cas de la mise en couche de la poudre par raclage, une lame droite se déplace parallèlement au substrat pour étaler une fine couche de poudre. Dans le cas de la mise en couche par contre-rouleau, un rouleau cylindrique se déplace parallèlement au substrat et tourne de telle manière à induire un vecteur vitesse, au niveau du point de contact avec le substrat, dans le même sens que celui de translation, pour étaler une fine couche de poudre. La première méthode d'étalement de la poudre est couramment utilisée dans les équipements industriels ce qui n'est pas le cas de la deuxième, moins répandue, mais plus appropriée pour étaler les poudres les plus fines. Les travaux proposés dans cet article sont réalisés dans le cadre du contre-roulage et portent sur l'utilisation d'un capteur chromatique confocal pour mesurer le lit de poudre et faire le lien avec des défauts éventuels du rouleau de mise en couche. La première partie présente l'intégration de ce capteur dans une machine LPBF ainsi que la chaine d'acquisition employée. La deuxième partie est consacrée à la qualification de la mesure. Enfin dans une dernière partie, nous présentons les mesures obtenues in-situ sur un lit de poudre. Les défauts identifiés sont mis en relation avec les défauts géométriques du système de mise en couche.

2 Description du système et du contexte de mesure

2.1 Machine et système de mise en couche

La machine utilisée est une machine de fusion laser sur lit de poudre métallique (procédé LPBF) équipée d'une tête d'impression permettant l'impression sur des plateaux circulaires de diamètre 100 mm ou sur des plateaux rectangulaires de 350 x 350 mm de côté en configuration standard. Elle dispose d'un système de mise en couche par rouleau. Ce dernier, permettant l'étalement de la poudre, est embarqué sur un chariot se translatant selon l'axe X de la machine (figure 2).

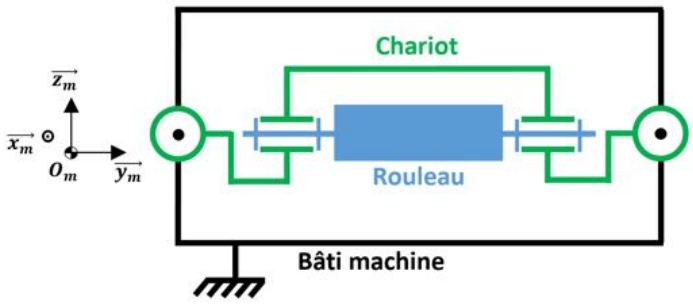


Figure 2 : Schéma technologique des axes chariot et du rouleau de la machine.

La phase de mise en couche comporte plusieurs paramètres réglables, dont deux seront particulièrement importants pour la mesure : la vitesse de translation du chariot et le rapport de synchronisation entre le rouleau et le chariot.

2.2 Montage du capteur

Le capteur considéré pour évaluer la topographie du lit de poudre est basé sur la technologie confocale chromatique (Leach, 2010). Une lentille chromatique génère l'image d'une source ponctuelle de lumière blanche comme un continuum d'images

monochromatiques. La lumière rétrodiffusée arrive à un trou d'épingle qui filtre toutes les longueurs d'onde sauf une seule correspondant à la distance recherchée. Lors de ces travaux, un capteur de 400 µm de plage de mesure et 22 nm de résolution axiale a été employé. Cette technologie de capteur présente l'avantage de ne nécessiter que le passage d'une fibre optique dans l'espace de travail de la machine, l'analyse de la lumière perçue par le capteur étant réalisée à l'extérieur par un boitier spécifique. À l'aide d'une pièce d'adaptation, le capteur est monté sur le chariot de mise en couche de la machine en lieu et place d'un des palpeurs utilisés pour dégauchir le plateau (figure 3). On fait l'hypothèse que la direction de mesure est proche de la normale au plateau de construction.

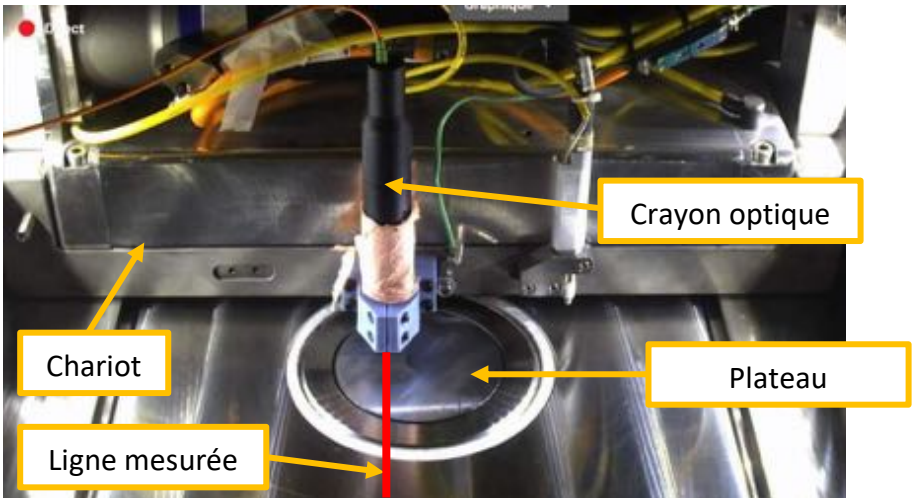


Figure 3 : Représentation du montage du capteur

2.3 Acquisition et traitement

Le capteur permet de délivrer une information correspondante à la distance du point mesuré dans l'axe du capteur à une fréquence fixée par l'utilisateur. En supposant la vitesse de déplacement du chariot constante et en effectuant la mesure suffisamment loin des zones d'arrêt et à vitesse réduite, il est possible de reconstruire la hauteur du lit de poudre sur une ligne en fonction de la position théorique du chariot de façon similaire aux travaux proposés par Quinsat et Tournier (Quinsat, 2012).

3 Qualification de la mesure

Dans la procédure de mesure du lit de poudre mise en œuvre dans ces travaux, le chariot servant pour la mise en couche est utilisé comme système de déplacement du capteur. Le guidage en translation de ce chariot est réalisé par deux liaisons pivots glissantes situées de part et d'autre de celui-ci (figure 2). Ainsi, la rectitude du déplacement du chariot impacte les résultats et il est donc nécessaire de la caractériser. Pour cela deux essais ont été menés in-situ : l'un sur un plan de référence et un autre sur le plateau de mise en couche. Ces essais sont présentés dans les deux paragraphes suivants, ils ont été réalisés avec une fréquence d'acquisition de 100 Hz et une vitesse de déplacement de 0,5 mm/s.

3.1 Mesure d'un étalon

Le premier essai réalisé consiste à mesurer une ligne sur un artéfact de défaut connu. Il s'agit plus particulièrement d'effectuer une mesure sur un disque en verre de diamètre 90 mm, positionné sur le plateau de construction, ayant un défaut de planéité inférieur à 64 nm. Les résultats bruts sont présentés à la figure 4, après correction de l'orientation et filtrage (filtre gaussien λ=200 µm) le profil représenté à la figure 5 est obtenu.

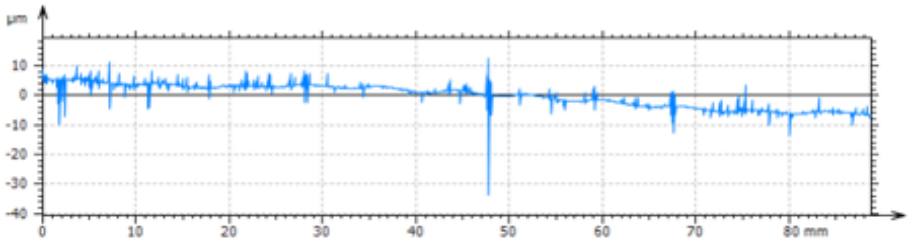


Figure 4 : Représentation du profil brut sur plan étalon

Ces résultats mettent clairement en évidence deux défauts, l'un de petite longueur d'onde (environ 10 mm) d'amplitude 1 µm et l'autre de plus grande longueur d'onde (environ 100 mm) et d'amplitude 2 µm. Le cumul de ces deux défauts ne dépasse pas 4 µm ce qui est dix fois inférieur à l'épaisseur de couche classiquement employée sur cette machine (40 µm).

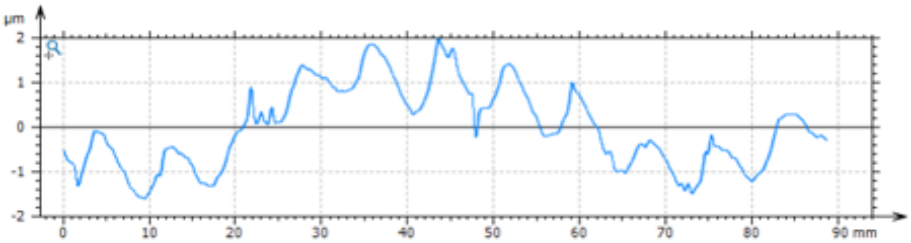


Figure 5 : Représentation du profil redressé et filtré pour le plan étalon

3.2 Mesure du plateau

Pour conforter les résultats précédents et afin de prendre en compte des mesures sur un matériau différent, un second essai est réalisé consistant cette fois à mesurer le plateau de fabrication en acier. La mesure d'un premier profil est effectuée sur le plateau de fabrication à l'aide d'une station de mesure en dehors de la machine (figure 6). Ce profil permet d'identifier le défaut de forme de la pièce à mesurer. Le défaut de rectitude sur le profil mesuré est ainsi inférieur à 4 µm.

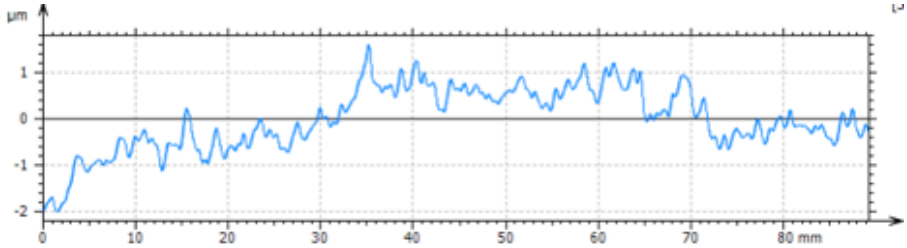


Figure 6 : Représentation du profil du plateau mesuré, redressé et filtré (filtre gaussien λ=200 µm) sur une station de mesure dédiée.

Une fois ce défaut identifié, il est alors possible de mesurer ce même plateau dans l'espace de travail de la machine (figure 7). Les mesures montrent un défaut total inférieur à 6 µm. Néanmoins, ce défaut comprend à la fois le défaut propre de la surface mesurée, mais aussi le défaut lié au déplacement du chariot. Afin de pouvoir comparer les deux profils, les deux mesures (in-situ et sur machine dédiée) ont été réalisées en prenant les précautions nécessaires afin de mesurer approximativement la même ligne sur la pièce. Compte tenu du défaut de planéité faible du plateau, les écarts induits par cette approximation peuvent être considérés comme négligeables. Ainsi, si l'on retire à ce profil, le profil correspondant au défaut de forme du plateau (figure 8), il est alors possible d'obtenir une estimation du défaut lié au système de déplacement.

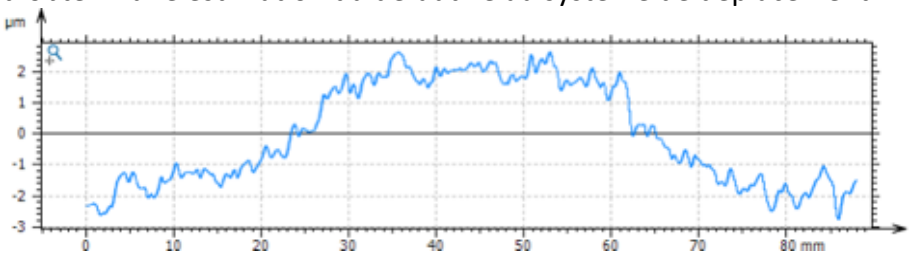


Figure 7 : Représentation du profil redressé et filtré (filtre gaussien λ=200 µm) pour le plateau de fabrication mesuré in-situ

Compte tenu de l'état de surface du plateau (rectifié : 16 µm de planéité mesurée au comparateur sur un marbre), le défaut de faible longueur d'onde identifié sur le plan étalon en verre n'est pas retrouvé sur cette mesure. Le défaut de plus grande longueur d'onde semble par contre aussi présent sur ce profil, confortant ainsi l'observation réalisée précédemment.

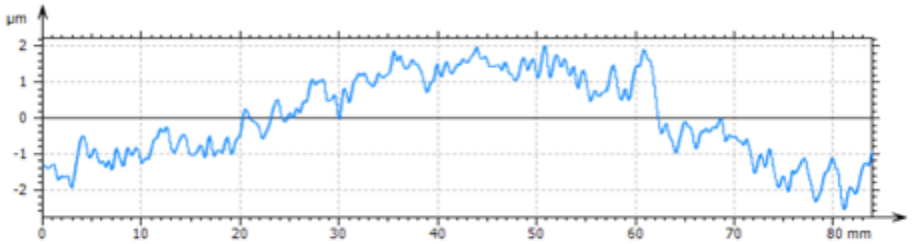


Figure 8 : Profil obtenu par différence des profils mesurés in situ et de défaut de forme pour le plateau de fabrication

À partir de ces deux résultats, il est possible de qualifier le système de mesure. Ainsi, les données que nous obtenons sont entachées d'une erreur inférieure à 4 µm correspondant à l'erreur de rectitude du chariot de déplacement. Ce résultat sera à prendre en compte dans l'analyse des écarts qui seront identifiés lors de la mesure du lit de poudre.

4 Mesure de la mise en couche et mise en relation avec la forme du rouleau

Après avoir qualifié le système de mesure, celui-ci est maintenant utilisé pour mesurer le lit de poudre in-situ lors d'une opération de mise en couche. La poudre mesurée, en IN718, est de granulométrie 10-53 µm (granulométrie moyenne). La mesure a été effectuée avant une maintenance préventive nécessitant le remplacement du rouleau.

4.1 Mesure de la mise en couche

Une fois la mise en couche réalisée (figure 9), le chariot effectue un deuxième déplacement sans étalement de poudre afin de réaliser la mesure. Les conditions expérimentales utilisées sont une vitesse de déplacement de 150 mm/s pour le chariot et une fréquence d'acquisition de 1000Hz. Les résultats obtenus sont représentés à la figure 10, la mesure a été effectuée sur une longueur plus importante que le plateau de 100 mm de diamètre et après avoir réalisé 6 couches de 40 µm.

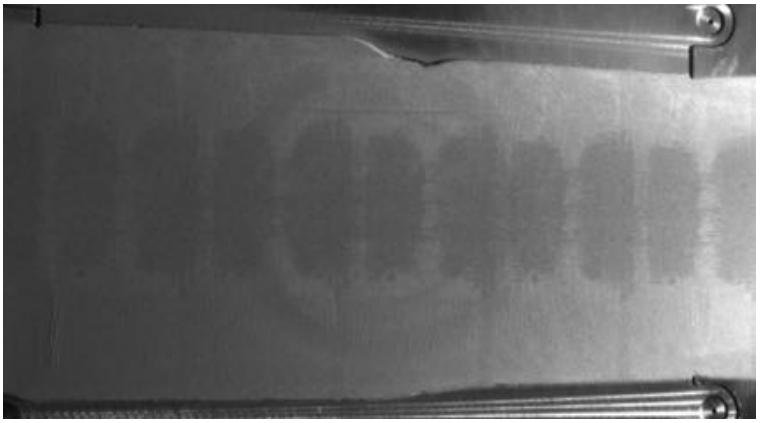


Figure 9 : Lit de poudre après mise en couche

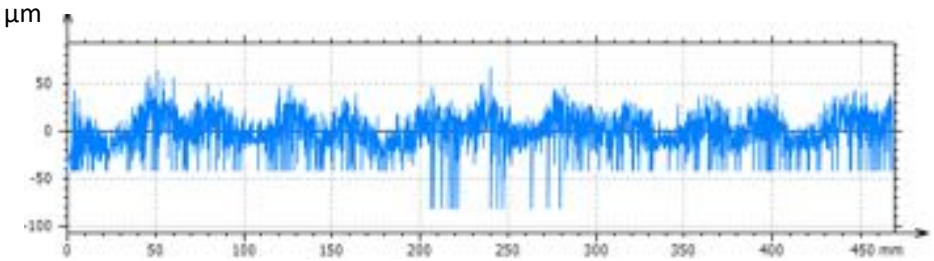


Figure 10 : Mesure du lit de poudre

Après filtrage par transformée de Fourrier, et en ne conservant que les longueurs d'onde entre 40 et 80 mm, les résultats obtenus (figure 11 courbe bleue) montrent clairement un défaut de rectitude de la ligne mesurée de plus de 20 µm soit la moitié de l'épaisseur de couche programmée et bien supérieure au défaut de rectitude de déplacement du chariot précédemment identifié.

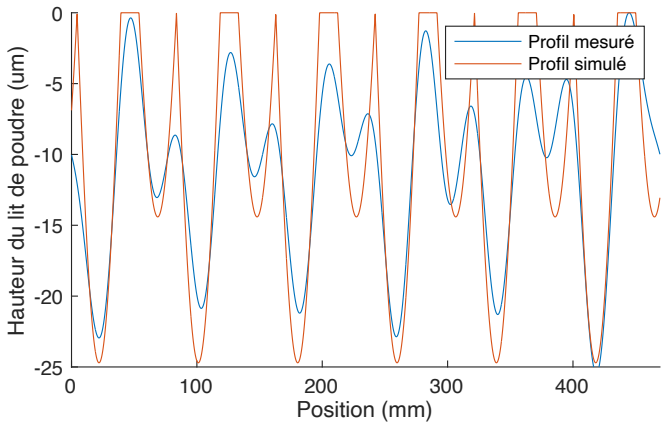


Figure 11 : Représentation des profils mesurés sur le lit de poudre et simulés

Sur ce profil nous remarquons la répétition de deux motifs périodiques d'amplitudes respectives de 8 et 20 µm. Cette répétition de motifs semble cohérente avec les observations du lit de poudre (figure 9) effectuée. Afin de vérifier si cette répétition de motifs, qui induit un défaut important sur le lit de poudre, peut provenir de la géométrie du rouleau, une simulation géométrique du procédé de mise en couche est proposée dans la partie suivante

4.2 Définition d'un Z buffer et modélisation du défaut de forme du rouleau

Le système de mise en couche utilisé dans ces travaux est un système à contre rouleau composé d'un rouleau de rayon nominal $\rho_{nom} = 50\,mm$ et d'un chariot de déplacement (2.1). La vitesse de rotation du rouleau est définie à partir de la vitesse de déplacement du chariot comme étant 4 fois la vitesse équivalente à un roulement sans glissement.

L'analyse du défaut de rectitude d'une ligne mesurée sur le lit de poudre a montré que ce défaut est composé de deux défauts périodiques et de même période, mais d'amplitudes différentes. On considère donc que le rouleau présente un défaut de circularité qui est la combinaison de deux défauts ρ_A et ρ_B déphasés de φ_B (Equ.1) avec deux excentrations (δ_A, δ_B). Le rayon du rouleau ρ est défini par l'équation Equ.2.

$$\begin{cases} \rho_A = A.\cos(\theta) + \delta_A \\ \rho_B = B.\cos(\theta - \varphi_B) + \delta_B \end{cases} \quad (1)$$

$$\rho = \max(\rho_{nom}, \rho_A, \rho_B) \quad (2)$$

Afin de valider cette hypothèse et identifier les grandeurs $A, B, \varphi_B, \delta_A \; et \; \delta_B$, un modèle de type Z-buffer permettant de simuler le lit de poudre obtenu est proposé. Il s'agit d'un modèle géométrique calculant l'ensemble des positions des points du rouleau $\rho(\theta)$ au cours du mouvement de mise en couche (combinaison de la rotation et de la translation du rouleau). Seuls les points ayant l'altitude la plus faible sont conservés pour représenter le lit de poudre. Une optimisation (Equ.3) est ensuite réalisée de façon à déterminer les grandeurs décrivant le défaut de circularité du rouleau.

$$(A, B, \varphi_B, \delta_A, \delta_B) = argmin_{A,B,\varphi_B,\delta_A,\delta_B}(Défaut\ mesuré - Défaut\ simulé)^2 \quad (3)$$

À partir des mesures effectuées sur le lit de poudre, les valeurs suivantes ont pu être identifiées : $(A, B, \varphi_B, \delta_A, \delta_B) = (30{,}3\ \mu m,\ 23{,}1\ \mu m, 3{,}71\ rad,\ 5{,}6\ \mu m,\ 8{,}6\ \mu m)$, permettant une simulation du lit de poudre assez représentative (figure 11). En effet, les simulations obtenues avec ces paramètres permettent de représenter assez correctement la répétition de ces deux motifs, des écarts sont notables et sont cohérents avec le défaut de rectitude du chariot. Néanmoins, le profil réel présente des sommets de crêtes moins prononcés que sur la simulation, ceci est dû en grande partie aux effets du filtrage réalisé sur le profil mesuré. L'écrêtage du profil simulé provient quant à lui de la limitation du rayon minimum du rouleau modélisé (Equ. 2) lors de la simulation du lit de poudre. Ainsi d'après le modèle proposé, le rouleau possède un défaut de forme avec deux « bosses » déphasées d'un peu plus de π rad et avec un

défaut d'excentration par rapport à son guidage en rotation (présence des offsets). Ce défaut influe directement sur la rectitude mesurée sur le lit de poudre.

4.3 Mesure du défaut de forme du rouleau

Les mesures ayant été effectuées avant une maintenance impliquant le changement du rouleau, le système de mise en couche a ainsi pu être démonté et ainsi le rouleau a pu être mesuré sur une machine à mesurer tridimensionnelle Zeis Accura équipée d'un palpeur de scanning Vast XXT. Sur le rouleau, trois entités ont été mesurées. Les deux portées cylindriques de diamètre 30 mm servant au guidage en rotation et le rouleau de diamètre 100 mm. Le nuage de points ainsi obtenu est ensuite analysé de façon à identifier les défauts du système de mise en couche. Un cercle de référence, de plus grand diamètre inscrit, est construit avec un centre choisi sur l'axe défini par les deux portées de guidage dans un plan correspondant aux lignes préalablement mesurées. Les écarts du nuage de points du plan choisi à ce cercle sont calculés. La grande quantité de points obtenus par le palpeur mesurant permet une représentation dense des écarts. Les résultats sont tracés à la figure 12. Ils mettent en évidence deux lobes d'amplitude 7 µm et 11 µm déphasés de π radian. Ils mettent aussi en avant une excentration de la forme mesurée par rapport à l'axe de rotation du cylindre. Ces résultats confortent la géométrie identifiée sur le lit de poudre. Néanmoins même si la forme est similaire, l'amplitude des défauts est trois fois plus faible que ceux identifiés à partir de la simulation laissant penser que l'approche géométrique devrait être complétée par une étude plus complexe du procédé de mise en couche (Meier 2019).

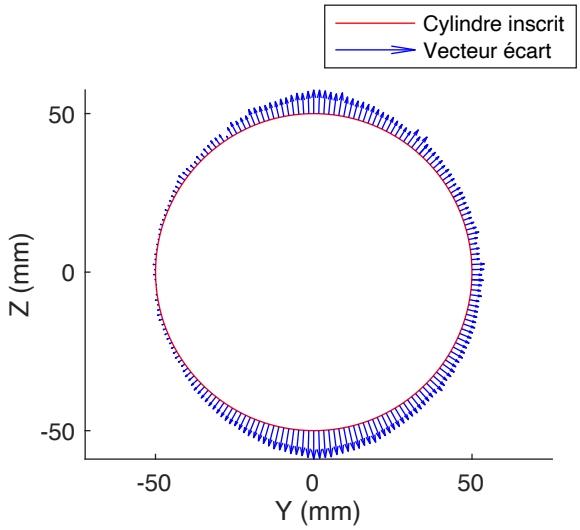


Figure 12 : Représentation des écarts mesurés.

5 Conclusion

Les travaux présentés dans cette étude portent sur l'analyse de la qualité du lit de poudre réalisé lors de la mise en couche. Il s'agit plus particulièrement d'étudier le défaut de rectitude du lit de poudre dans la direction de déplacement du système de mise en couche. L'intégration d'un capteur chromatique confocal a été réalisée de façon à pouvoir mesurer en contexte in-situ d'une ligne sur le lit de poudre. La qualification de la mesure a mis en évidence une erreur, due à la rectitude du système de déplacement, sur la mesure inférieure à 4 µm et compatible avec l'exploitation envisagée.

La mesure d'une ligne sur le lit de poudre a mis en évidence un défaut périodique d'amplitude supérieur à 20 µm. Après avoir proposé une modélisation géométrique de la mise en couche incluant un défaut de forme du rouleau, une géométrie à deux lobes du rouleau serait à l'origine du défaut mesuré. Cette hypothèse a pu être en partie vérifiée sur la mesure du rouleau de mise en couche.
Ainsi la maîtrise de la qualité de la mise en couche passe nécessairement par la bonne définition de la géométrie du rouleau et de son système d'entrainement. Afin de valider ces travaux, des mesures complémentaires pour différentes granulométries vont être réalisées et ainsi qu'une étude plus poussée des mécanismes mis en jeu lors de la réalisation du lit de poudre.

Références

D. M. Dinh, N. Muller, Y. Quinsat (2021) Layering Defects Detection in Laser Powder Bed Fusion using Embedded Vision System, Computer-Aided Design & Applications, vol. 18(5), pp. 1111-1118.

B. K. Foster, E. W. Reutzel, A.R. Nassar, B. T. Hall, S.W. Brown, C.J. Dickman (2015), Optical, layerwise monitoring of powder bed fusion, Event26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2015 - Austin, United States

H. Chen, Y. Chen, Y. Liu, Q. Wei, Y. Shi, W. Yan (2020), Packing quality of powder layer during counter-rolling-type powder spreading process in additive manufacturing, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 153, pp. 103553.

C. Meier, R. Weissbach, J. Weinberg, W. A. Wall, A. John Hart (2019), Critical influences of particle size and adhesion on the powder layer uniformity in metal additive manufacturing, Journal of Materials Processing Technology, vol. 266, pp. 484-501.

Y. Quinsat, C. Tournier (2012), In situ non-contact measurements of surface roughness, Precision Engineering, vol. 36. pp. 97-103.

R. Leach (2010). In: Fundamental principles of engineering nanometrology. Elsevier.

L. Scime, D. Siddel, S. Baird, V. Paquit (2020), Layer-wise anomaly detection and classification for powder bed additive manufacturing processes: A machine-agnostic algorithm for real-time pixel-wise semantic segmentation, Additive Manufacturing, vol. 36, pp. 101453.

N. Southon, P. Stavroulakis, R. Goodridge, R. Leach (2018), In-process measurement and monitoring of a polymer laser sintering powder bed with fringe projection, Materials & Design, vol. 157, pp. 227-234.