

Considération des supports de fabrication additive pour le parachèvement par usinage

P. DIDIER^a, G. LE COZ¹, G. ROBIN¹, P. LOHMULLER¹, B. PIOTROWSKI¹, A. MOUFKI¹, P. LAHEURTE¹

a. Université de Lorraine, CNRS, Arts et Métiers ParisTech, LEM3, F-57000 Metz, France

Résumé :

Les supports en fabrication additive peuvent être considérés comme une opportunité en jouant le rôle de montage d'usinage pour le parachèvement des surfaces fonctionnelles. Dans sa globalité, les structures composées de la pièce et de ses supports sont flexibles, peuvent causer des vibrations et des problèmes d'usinabilité. Il en résulte potentiellement des surfaces irrégulières de qualité moindre.

Cette étude montre l'importance du choix des supports de fabrication additive en vue du fraisage de pièces fabriquées en Ti-6Al-4V par procédé SLM. Si les supports proposés par les logiciels dédiés à la fabrication additive ne permettent pas d'anticiper la rigidité des supports, les structures Lattices permettent un contrôle de leur propriétés mécaniques. Des essais de fraisage périphérique sont réalisés sur des parois mince, sur leur support de fabrication. Différents types de supports sont utilisés pour fabriquer les échantillons. Trois type de mesure sont retenues : efforts de coupe, déplacement et qualité de surface. Le contrôle de la rigidité des supports apparait comme une solution pour stabiliser l'usinage de structures minces et flexibles et peut être pris en considération dans la chaîne numérique de fabrication.

Mots clefs : Fabrication additive SLM, supports, lattices, fraisage, Alliage de Titane

1 Introduction

L'intérêt croissant pour les procédés de fabrication additive et en particulier pour le procédé de Selective Laser Melting (SLM) a conduit au développement d'une discipline associée : le « design for additive manufacturing ». Elle offre un ensemble d'opportunités, de considérations mais aussi de contraintes [1]. Elle offre l'opportunité de repenser le produit pour tirer avantage des capacités des nouveaux procédés [2]. Par exemple, dans le domaine biomédical, il est possible de réaliser des implants sur-mesure qui suivent parfaitement la topologie de l'os considéré [3]. Cette liberté a permis l'élaboration et la production de macro-structures, optimisés topologiquement [4] ainsi que des réseaux complexes de poutres interconnectées telles que les structures lattices [5]. Ces topologies de pièces induisent des géométries complexes et des surfaces minces.

Les procédés de fabrication additive génèrent également un ensemble de contraintes [1, 7]. Le procédé SLM reste couteux et les compositions d'alliages disponibles sont limitées. La maîtrise des procédés de fabrication permet d'atteindre des taux de porosités faibles mais les états de surface restent irréguliers et dépendent fortement de l'orientation de pièces sur le substrat de fabrication [8, 9]. De

plus, les contraintes résiduelles liées au phénomène thermique lors du dépôt de matière et son refroidissement génèrent un ensemble de déviations [10]. Au-delà du rôle nécessaire des supports de fabrication, leur rôle limite les déformations par un renforcement de la structure globale mais aussi en influant la répartition de la chaleur au cours de la fabrication [11]. Ces supports devront être par la suite retirés, nécessitant du temps, des opérations manuelles et générant des défauts topologiques majeurs.

Après fabrication additive, des opérations de finition des pièces sont donc nécessaires, par traitement chimique [12], mécanique [13] ou même par laser [14]. Les traitements post-fabrication additive métallique restent un des enjeux majeurs dans ce domaine. Certaines surfaces doivent répondre à des qualités dimensionnelles de pièces industrielles, et une finition par usinage ou rectification est nécessaire [15]. Cette démarche est d'ores et déjà adoptée par les constructeurs de machines avec des propositions d'hybridation (Additive manufacturing and milling) pour des dépôts métalliques où dépôt et finition par enlèvement de matière sont programmés dans une même enceinte [16]. Dans le cadre des technologies SLM la pièce est noyée sous la poudre et l'hybridation est plus complexe. Par conséquent, il sera envisagé une démarche de complémentarité entre machine additive et soustractive. Le repositionnement de pièce devra alors être considéré.

En vue de l'opération de post-traitement par usinage, il est possible de considérer les supports de fabrication non plus comme une contrainte mais comme une opportunité, en jouant le rôle de montage d'usinage. Les supports de fabrication sont conservés en vue de réaliser des reprises par usinage sur des surfaces spécifiques. Cette démarche permet un gain d'opérations pour la réalisation des surfaces fonctionnelles. Le premier défi technique qui en découle porte sur positionnement et l'orientation de l'objet imprimé afin de rendre accessible à l'outil de coupe les surfaces reprises. Le second porte sur la géométrie des surfaces et sur la faible rigidité des structures fabriquées, incluant pièce et supports. Ces conditions sont défavorables pour l'usinage et peuvent engendrer une déflexion de la paroi et des vibrations peuvent apparaître [17]. Ce phénomène génère des déviations dimensionnelles et géométriques et un pauvre état de surface [18]. Il est alors nécessaire de comprendre les phénomènes vibratoires pour les anticiper, les contrôler et les limiter en jouant notamment sur les vitesses de coupe et les engagements d'outils dans la matière [19, 20, 21]. Si la pièce imprimée n'est que peu modifiable de par la fonction au quelle elle a été conçue, les supports sont modulables et peuvent être utilisés pour modifier les propriétés de l'ensemble pièce et supports, au même titre que des surfaces sacrificielles [22] ou des masselottes [23]. Cependant dans la chaîne numérique de fabrication additive, la définition des supports de fabrication ne prend pas en compte les contraintes de post traitement et en particulier les problèmes de vibration en usinage. En effet, les propriétés mécaniques équivalentes ne sont pas considérées.

L'objet de ce travail est de montrer l'influence des supports de fabrication SLM sur la qualité des surfaces parachevées. Une étude expérimentale est réalisée sur des pièces de type plaque imprimées sur leurs supports de fabrication. Différentes structures de supports sont comparées, de rigidités différentes. Les signaux d'efforts de coupe et de déplacements de la plaque par vibromètre laser sont analysés puis corrélés et l'état de surface final de la pièce caractérisé par microscopie confocale.

2 Moyens et méthodes

2.1 Définition géométrique des échantillons

La mise en évidence de différences au niveau de la stabilité et de potentiels problèmes vibratoires en usinage de pièces issues de la fabrication additive SLM passe tout d'abord par la définition géométrique d'échantillons adéquats. Précédemment, Thevenot et al. [21] et Seguy et al. [18] ont

respectivement analysé le fraisage d'une paroi d'acier (S235) de 1mm d'épaisseur et d'une paroi d'aluminium (2017) de 3mm d'épaisseur et de 20 mm de hauteur. Dans l'étude proposée, le système est composé de deux parties en Ti-6Al-4V, voir figure 1. La déflexion majeure est liée à la géométrie des supports de fabrication et à leur faible rigidité. Ces deux éléments solidaires sont fabriqués sur un troisième bloc, voir figure 2(c), permettant le bridage de l'échantillon. Le parallélépipède supérieur de 3 mm d'épaisseur (l_1), de 9 mm de hauteur (l_2) et de 9 mm de long (l_3), constitue la partie parachevée par usinage. La partie inférieure correspond au support de fabrication, d'une épaisseur égale à (l_1) et d'une hauteur (l_3) de 4.5 mm. Les dimensions géométriques étant fixées, la rigidité de l'échantillon est contrôlée par la géométrie et l'architecture des supports. Deux familles de structure sont considérées : issues de la chaîne numérique de fabrication SLM et structures lattices. Deux géométries de supports sont extraites du logiciel Magics : la structure « Web » est composée de murs verticaux se croisant au centre de la surface, et la structure « Block », formée de murs verticaux perpendiculaires formant un quadrillage et perforée de motif losange. Les structures lattices sont basées sur la répétition spatiale d'un motif élémentaire. En ajustant la topologie et le diamètre de poutres, elles permettent le contrôle de la rigidité et la densité équivalente de la globale. Ces données sont essentielles à la caractérisation des phénomènes dynamiques en usinage. En effet, par le contrôle du rayon des poutres et de la taille de maille, donc de la densité relative de la structure, il est donc possible d'en contrôler son module de Young équivalent [24]. Deux structures ont été retenues dans cette étude : la structure octet-truss, connue pour ses performances en terme de rigidité par rapport à sa densité relative, et la structure diagonale [25]. Deux diamètres de poutre (0.300 mm et 0.375 mm) sont retenus pour chacun des deux motifs de base. Le même volume de motif élémentaire est de $1.5 \times 1.5 \times 1.5 \text{ mm}^3$ pour chaque type de structure. La même répétition ($6 \times 2 \times 3$) dans les 3 directions de l'espace (x, y, z) permet de définir des échantillons de dimensions globales fixes. Pour chaque structure, quatre échantillons sont réalisés avec des paramètres adaptés à l'alliage de Ti-6Al-4V (Puissance $P = 200 \text{ W}$, vitesse de balayage $v = 1650 \text{ mm/sec}$ et distance de hatching $H = 80 \mu\text{m}$).

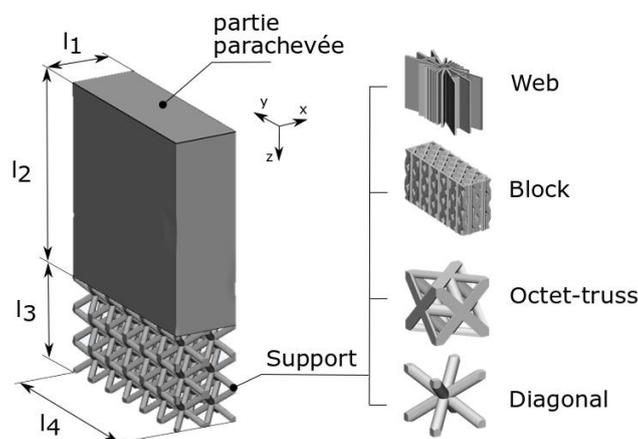


Figure 1 - Paramètres géométriques et structurels des échantillons

2.2 Définition de la rigidité des supports et première fréquence modale

Comme indiqué précédemment, l'échantillon est composé de deux parties : la plaque supérieure et les supports inférieurs. Encastré à sa base, la principale déformation est une flexion autour de l'axe y , voir figure 1. Afin de comprendre les caractéristiques dynamiques des vibrations au cours du fraisage, il est important de déterminer le mode de vibration de l'ensemble plaque-support. Les échantillons ayant

tous le même volume externe, leur premier mode vibratoire correspond à une flexion autour de l'axe y . Ce mode de vibration est directement proportionnel à leur rigidité. Leur rigidité équivalente peut ainsi être évaluée de par leur première fréquence naturelle. Un marteau d'impact permet de déterminer les fréquences naturelles des structures. Le déplacement est mesuré à l'aide d'un vibromètre laser. La mesure sans contact permet de ne pas influencer les résultats obtenus. Les structures sont sollicitées sur une gamme de fréquence de 1Hz à 10 000Hz. Le laser est pointé au milieu de la partie supérieure de la plaque, voir figure 2(a). Une transformée de Fourier (FFT) est réalisée pour extraire le spectre de fréquence du signal vibratoire. Le premier mode de fréquence varie entre une valeur basse de 743 Hz pour la structure lattice Diagonal (diamètre de poutre de 300 μm) et 6656 Hz pour l'échantillon Block, voir tableau 1. La grande répétabilité du moyen de fabrication est confirmée par la faible dispersion des résultats. Cette dispersion est légèrement plus importante pour les structures avec des poutres 0.300 mm (8.21%) que pour celles avec des poutres de 0.375 mm (4.59%). En effet à ce niveau de résolution, les irrégularités géométriques dues au procédé sont de plus en plus prédominantes avec la diminution du diamètre des poutres [26].

Structure	f_1 (Hz)	Deviation (%)	Damping η
Diagonal (300 μm)	743	8.21	0.0024
Diagonal (375 μm)	1459	4.59	0.0018
Octet-truss (300 μm)	2780	5.52	0.0022
Octet-truss (375 μm)	4601	2.04	0.0012
Block (Magics)	6656	2.72	0.0018
Web (Magics)	2456	1.14	0.0011

Tableau 1 – Première fréquence modal des structure

2.3 Fraisage périphérique

Les essais de fraisage de finition de la plaque sont réalisés sur un centre d'usinage Roeders RXP200DS équipé d'un plateau Erowa ITS50 pour le positionnement des échantillons. L'outil choisi pour l'opération de fraisage périphérique est un outil carbure revêtu TiAlN référencé Belet 110-1. L'outil 2 tailles de diamètre 3mm possède quatre dents, un angle d'hélice de 30° et un angle de coupe positif compris entre 8 et 10°. La queue de l'outil de diamètre 6mm est montée en porte outil à pince HSK25 BIG New Baby Chuck. Les échantillons précédemment définis sont bridés en étau et montés sur une platine dynamométrique Kistler 9256C2 permettant une mesure des efforts de coupe dans les trois directions de l'espace, voir figure 2(a). Un amplificateur de charge Kistler 5017B et un système d'acquisition NI Daq associé à un programme Labview dédié permettent de compléter la chaîne d'acquisition de mesure. L'ensemble machine et outil est considéré parfaitement rigide en comparaison à l'échantillon. Comme pour les essais d'impact, le déplacement de la paroi mince au cours de l'usinage est mesuré par vibromètre laser, pointé au milieu de la partie supérieure de la plaque, voir figure 2(a). Les essais de fraisage périphérique sont réalisés dans des conditions de finition du Ti-6Al-4V, avec une vitesse de coupe de 141 m/min, une avance par dent (f_z) de 14 $\mu\text{m}/\text{dt}$ et un engagement axial et radial (a_e) de 1 et 0.2 mm, voir figure 2(b). La vitesse de rotation (N) de la broche est ainsi de 15 000 tr/min. Deux passes d'usinage sont réalisées sur chaque échantillon. Les mesures présentées correspondent à la seconde passe afin de garantir l'exactitude de l'engagement axial. La topographie des surfaces est obtenue après les essais de fraisage par microscope confocal Leica DCM3D.

L'évolution temporelle des efforts de coupe, des déplacements et des topographies des surfaces sont évalués suivant deux échelles :

- Échelle globale (sur toute la plaque) : le comportement dynamique de la structure dépend de la position de la sollicitation, spécialement aux extrémités de la plaque ;
- Échelle locale (dizaines de μm) : la sollicitation de chaque arête de coupe sur la surface.

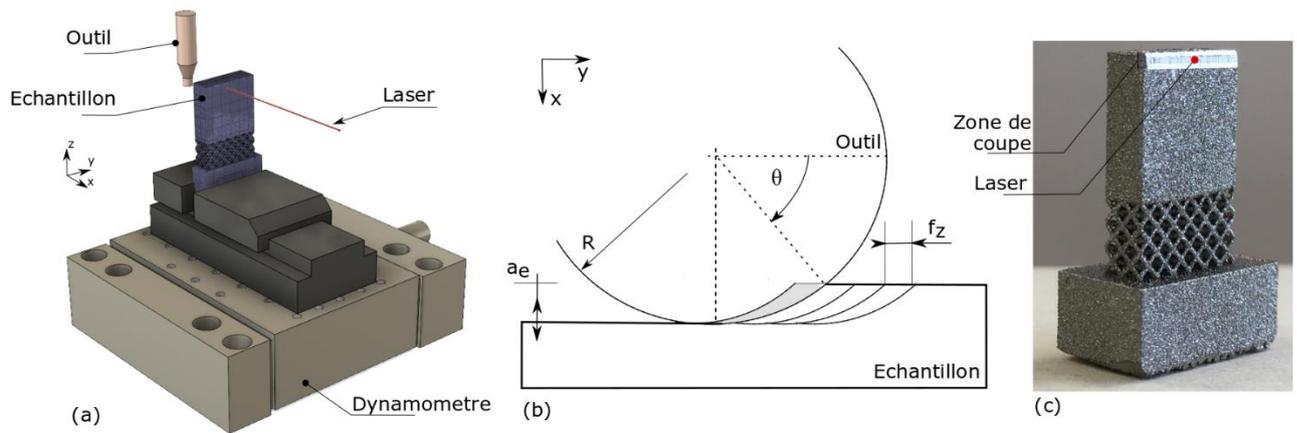


Figure 2 – (a) Montage d'usinage, (b) schéma de coupe et paramètres associés et (c) échantillons fabriqués présentant la surface parachevée.

3 Résultats

Afin d'identifier deux régimes de coupe différents (stable et instable), deux structures de rigidités éloignées sont comparées figure 3 : la structure Block ($f_1 = 6656 \text{ Hz}$) et la structure Octet-truss - $300 \mu\text{m}$ ($f_1 = 2780 \text{ Hz}$). Le déplacement à l'échelle globale est tout d'abord considéré. Quel que soit la rigidité de la structure, le milieu du signal présente un aspect stable, composant la majorité du signal. Au début et à la fin du signal, des effets de bord sont visibles avec une augmentation de l'amplitude par rapport à la zone stable. Il apparaît que plus la structure est flexible, plus l'amplitude de déplacement est importante. La même tendance est observée aux extrémités des signaux. Les déplacements à l'échelle locale sont évalués figure 4. La zone sélectionnée correspond au milieu de la plaque pendant trois tours d'outils. L'impact de chaque dent de coupe est clairement observé, avec une période de 1 ms . Quatre extremums correspondent ainsi à une rotation de l'outil de 4 ms . Il apparaît que le déplacement imposé par chaque dent de l'outil n'est pas équivalent, typique d'un faux rond de l'outil et/ou d'un défaut de taillage. Les déplacements observés dans la direction normale à la surface usinée sont corrélés avec les efforts de coupe dans la même direction F_x . Pour la structure Block, de même que les signaux en déplacement, la majeure partie du signal semble stable comme le montre la figure 3(a). Des effets de bords en entrée et sortie d'usinage apparaissent, marqués par des efforts plus faibles. Cependant, des irrégularités et instabilités sont notables tout au long de la plaque pour la structure Octet-truss, non observées sur le signal de déplacement, voir figure 3(b). A l'échelle locale, pour l'échantillon Block, l'impact de chaque dent apparaît distinctement. Tout comme le signal en déplacement, une asymétrie est observée entre les différentes dents confirmant la corrélation entre les deux signaux. Cependant, pour l'échantillon plus flexible Octet-truss, l'impact de chaque dent d'outil est difficilement identifiable. En terme d'amplitude de signal d'effort, celui-ci décroît avec la plaque moins rigide.

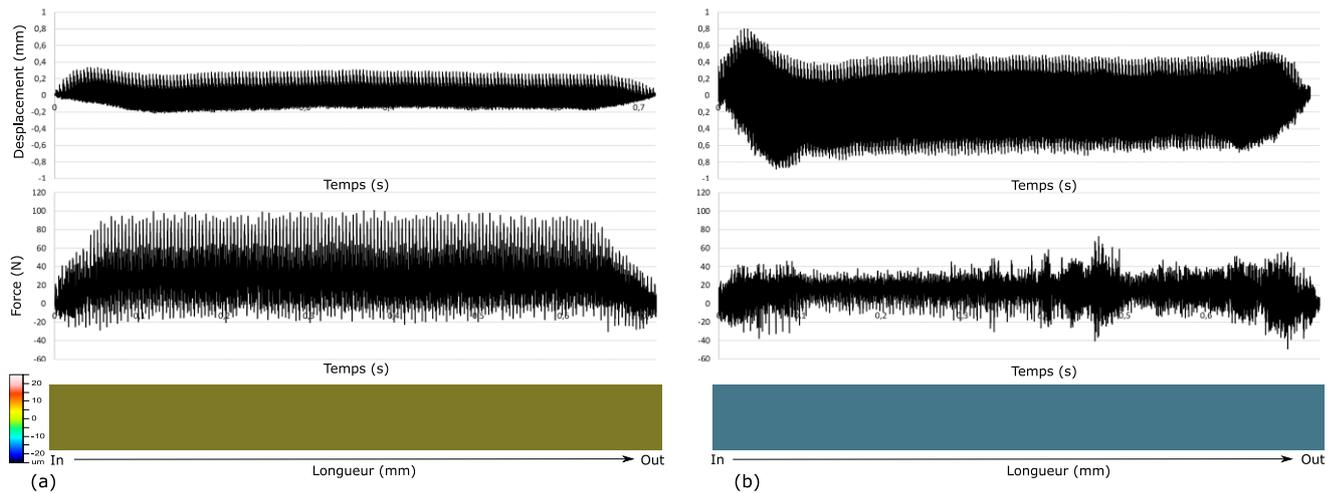


Figure 2 - Signaux déplacements, efforts et états de surface à l'échelle globale pour (a) la structure Block et (b) la structure Octet-truss diamètre 0.3 mm

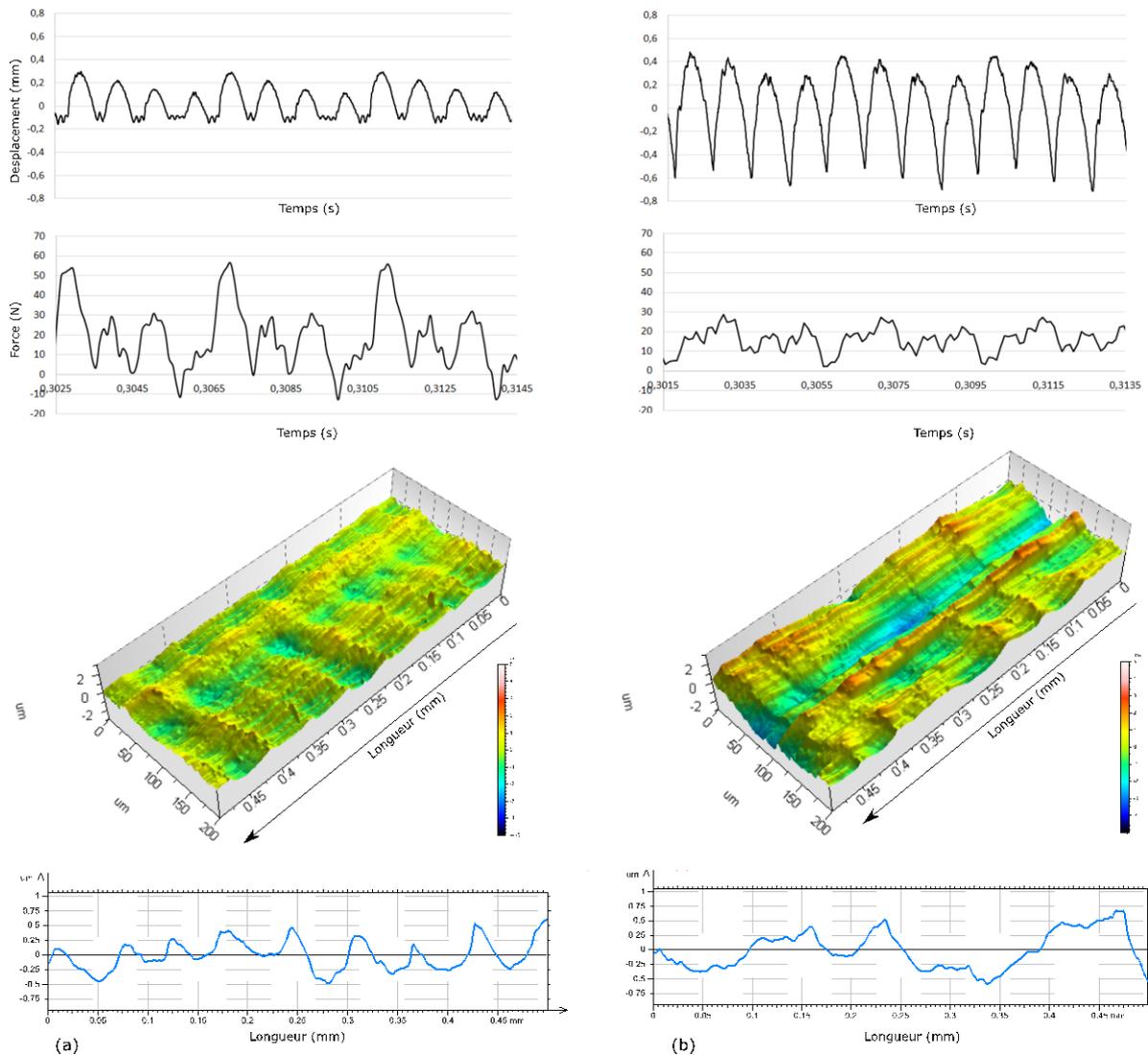


Figure 3 - Signaux de déplacements et d'efforts, état de surface et profil surfacique de la zone stable centrale des plaques (a) Block et (b) Octet-truss 0.3 mm

Les figures 3(a) et 3(b) présentent les états des surfaces tout au long des surfaces usinées. Les états de surface apparaissent complètement différents pour les deux échantillons. Pour la structure Block plus rigide, les variations de hauteurs sur toute la surface restent peu importantes et sont de l'ordre de 10 μm . Cette variation est due aux effets de bord, particulièrement à la sortie de l'outil. Malgré ces effets de bord, l'état de surface global de ce type d'échantillon est régulier. Au contraire, l'usinage des structures plus flexibles Octet-truss laisse apparaître des surfaces beaucoup moins régulières. Les variations de hauteurs peuvent atteindre 30 μm et les vibrations ponctuelles observées sur les signaux d'effort sont également notables sur la surface. A l'échelle locale, les profils de surface sont extraits sur des longueurs de 0.5 mm, figure 4(a) et 4(b). La plaque Block présente des ondulations de surface dues à la coupe. L'espace entre chaque ondulation est de 0.0556 mm, correspondant à l'avance par tour de l'outil. Pour la plaque Octet-truss, les ondulations sont moins visibles et l'état de surface est plus chaotique

4 Discussion

Une corrélation peut être établie entre la rigidité de la plaque et son déplacement en flexion. Plus la structure est flexible et plus son déplacement est important. Cette tendance est confirmée par l'évolution du déplacement moyen de chaque structure (en zone stable du signal) par rapport à sa première fréquence propre, voir figure 5. Seule la structure la plus flexible (diagonale - 300 μm) n'a pas permis d'obtenir de signal exploitable, du fait d'un déplacement trop important de la plaque et d'une saturation du signal laser. Il apparaît une augmentation non linéaire de cette amplitude avec la diminution de f_1 . Cette amplification s'explique par la proximité de plus en plus grande de la fréquence propre de la structure avec la fréquence d'excitation par l'outil (1000 Hz). Cependant, ces informations ne sont pas suffisantes pour confirmer la coupe réelle et régulière de la matière. D'autre part, sur les signaux globaux de déplacements, des effets de bords sont observés lorsque la fraise usine les extrémités de la plaque. Lorsque la sollicitation est positionnée en bordure de plaque, la flexion est amplifiée et le déplacement au bord de la plaque est plus important que le déplacement lors de la coupe au centre de l'échantillon. Ce phénomène est d'autant plus marqué que l'épaisseur de la plaque est fine ou plus généralement que la plaque est flexible. Ces effets de bords sont par ailleurs souvent observés en fraisage périphérique de parois minces [19].

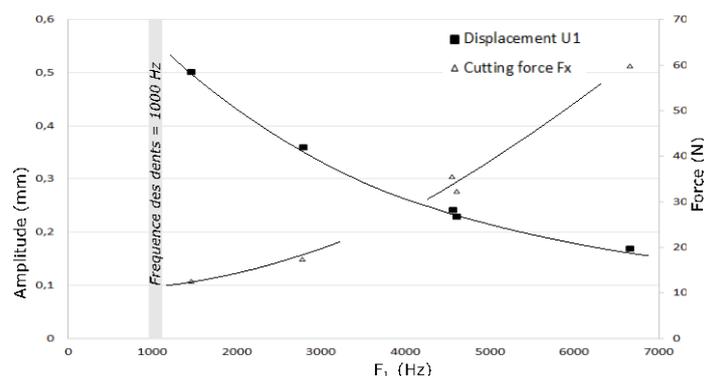


Figure 5 – Evolution des déplacements et des efforts de coupe avec la rigidité des structures

Contrairement aux signaux en déplacement, l'amplitude du signal d'effort de coupe décroît avec la perte de rigidité des échantillons. Cette décroissance permet de mettre en évidence une coupe de la matière de moins en moins opérationnelle. Plus la structure est flexible et plus sa flèche en flexion est

élevée, et donc par conséquent moins de matière est enlevée. Ce phénomène de refus de coupe est d'autant plus prédominant que l'engagement axial est faible. En effet, dans ces conditions opératoires, les ordres de grandeur de déplacement en flexion des structures sont les mêmes que l'engagement axial a_e . Ces résultats sont appuyés par les profils surfaciques présentés figure 6, comparant le décalage de hauteurs entre la surface brut (à droite) et la surface parachevée (à gauche) pour les deux mêmes types d'échantillons. Après deux passes radiales de 200 μm , le décalage de la surface générée par rapport à l'état de surface initial devrait être théoriquement de 400 μm . Pour la structure Block, la plus rigide des structures étudiées, cette profondeur de passe réelle est proche de 300 μm . Pour la structure octet-truss, ce décalage est inférieur à 100 μm . La déflexion des parois altère considérablement la tenue des cotes dimensionnelles attendues. Par ailleurs, les irrégularités et singularités observées sur les signaux d'effort et les états de surfaces de l'échantillon Octet-truss indiquent des instabilités ponctuelles dans la coupe et des problèmes vibratoires. De plus, les structures les plus flexibles ont une fréquence de résonance plus proche de la fréquence d'excitation, amplifiant l'apparition de vibrations et rendant la coupe d'autant plus irrégulière. A l'échelle d'un tour de fraise, une asymétrie entre les quatre dents est détectée par les signaux d'effort et de déplacement. Ce phénomène s'explique par un léger défaut lors du taillage des dents de l'outil. Lors du fraisage de finition, où les engagements radiaux et l'avance par dent sont faibles, ces défauts sont particulièrement mis en lumière. Il en résulte pour la structure Block une ondulation d'une période correspondant à un tour de fraise, figure 4(a), générée par l'arête de coupe la plus excentrée. Pour la structure Octet-truss, la surface finale est plus chaotique et l'ondulation de fraisage n'est plus perceptible, figure 4(b). Le mouvement trochoïdal des dents de l'outil, couplé à l'oscillation de la plaque, produit une topographie de surface particulièrement dégradée. La déflexion trop importante de l'échantillon étant liée à la rigidité des supports trop flexible, on peut donc affirmer que le contrôle de la rigidité équivalente des supports conditionne directement l'état de surface finale des pièces usinées.

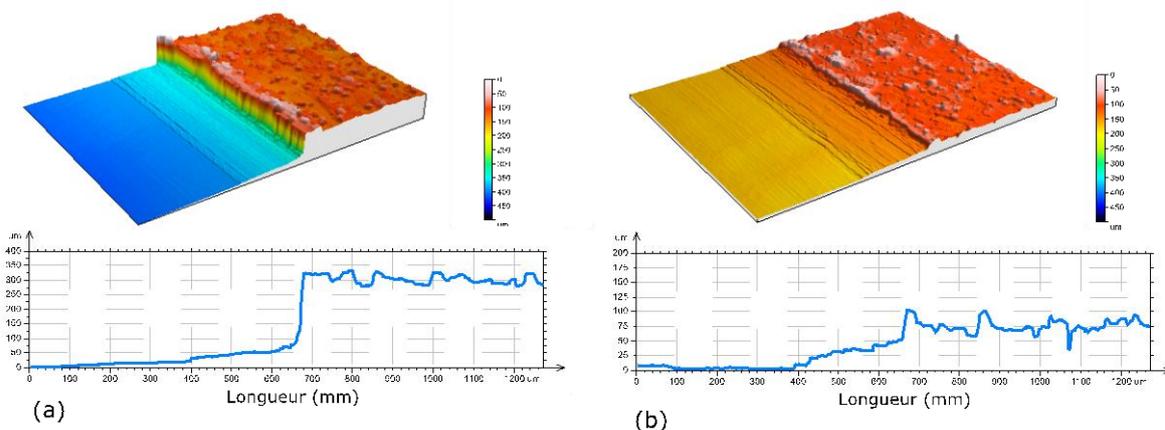


Figure 6 – Profile de surface entre surface brut et parachevée pour les structures (a) Block et (b) Octet-truss 0.3 mm

Les structures de supports en fabrication additive, si elles sont utilisées comme montage d'usage, jouent donc un rôle primordial dans la qualité du parachèvement des pièces par fraisage. Leur rigidité permet à la fois d'influer sur la rugosité et l'état de surface finale des pièces, mais aussi sur les tolérances dimensionnelles attendues. Les supports de type lattices, bien que moins rigides que les supports traditionnels, permettent néanmoins la détermination de leur comportement mécanique équivalent. Ainsi, intégrés dans la chaîne numérique de fabrication par un couplage analytique – numérique précédemment développé [27], ils pourraient permettre une anticipation des problèmes liés au parachèvement.

6 Conclusion

Des essais de fraisage périphériques ont été menés sur des plaques fines et leurs supports obtenus par fabrication additive afin d'en étudier le parachèvement. Des structures de rigidités différentes ont été utilisées, de par le contrôle de la géométrie et de l'architecture des supports de type Lattices. Des supports de fabrication obtenus par un logiciel commercial ont également été investigués. Trois types de résultats ont été investigués : le déplacement de l'extrémité libre de la plaque supérieure usinée, les efforts de coupe et l'état de surface final résultant de la coupe. La corrélation entre les différents signaux permet de mettre en évidence une coupe de plus en plus irrégulière et ineffective avec la perte de rigidité des supports, occasionnant un état de surface de plus en plus dégradé. L'étude a ainsi montré l'importance des supports en terme de rigidité sur la stabilité de la coupe en fraisage périphérique pour le parachèvement de surface issues de la fabrication additive SLM.

La chaîne numérique actuelle ne permet pas un contrôle optimal des propriétés mécaniques des supports de fabrication. Les structures Lattices, dont les propriétés mécaniques, de densité et de rigidité sont contrôlables, s'imposent ainsi comme des excellents candidats.

Références

- [1] M. K. Thompson et al., "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 65, no. 2, pp. 737–760, 2016.
- [2] B. S. Ian Gibson, David Rosen, *Additive Manufacturing Technologies - Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. 2010.
- [3] P. Didier, B. Piotrowski, M. Fischer, and P. Laheurte, "Mechanical stability of custom-made implants : Numerical study of anatomical device and low elastic Young ' s modulus alloy," *Mater. Sci. Eng. C*, 2016.
- [4] Y. Saadlaoui, J. L. Milan, J. M. Rossi, and P. Chabrand, "Topology optimization and additive manufacturing: Comparison of conception methods using industrial codes," *J. Manuf. Syst.*, vol. 43, pp. 178–186, 2017.
- [5] X. Z. Zhang, M. Leary, H. P. Tang, T. Song, and M. Qian, "Selective electron beam manufactured Ti-6Al-4V lattice structures for orthopedic implant applications: Current status and outstanding challenges," *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, vol. 22, no. 3, pp. 75–99, 2018.
- [6] M. P. Bendsøe and O. Sigmund, *Topology optimization: theory, methods, and applications*, vol. 2nd Editio, no. 724. 2003.
- [7] P. D. R Hague, I Campbell, "Implications on design of rapid manufacturing," *Proc. Instn Mech. Engrs*, vol. 27, pp. 189–353, 2003.
- [8] M. Simonelli, Y. Y. Tse, and C. Tuck, "Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti-6Al-4V," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 616, pp. 1–11, 2014.
- [9] M. Leary, *Surface roughness optimisation for selective laser melting (SLM)*. Elsevier Ltd, 2017.
- [10] I. Y. L. Mugwagwaa*, D. Dimitrova, S. Matopea, "Influence of process parameters on residual stress related distortions Influence of process parameters on residual stress related distortions in selective laser melting in selective laser melting Costing models for of capacity in Industry between used cap," *Procedia Manuf.*, vol. 21, no. 2017, pp. 92–99, 2018.
- [11] A. Hussein, L. Hao, C. Yan, R. Everson, and P. Young, "Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213, no. 7, pp. 1019–1026, 2013.

- [12] Z. Baicheng et al., “Study of selective laser melting (SLM) Inconel 718 part surface improvement by electrochemical polishing,” *Mater. Des.*, vol. 116, pp. 531–537, 2017.
- [13] F. Salvatore et al., “Experimental and numerical study of media action during tribofinishing in the case of SLM titanium parts,” *Procedia CIRP*, vol. 58, pp. 451–456, 2017.
- [14] K. C. Yung, T. Y. Xiao, H. S. Choy, W. J. Wang, and Z. X. Cai, “Laser polishing of additive manufactured CoCr alloy components with complex surface geometry,” *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 262, no. January, pp. 53–64, 2018.
- [15] E. Brinksmeier, G. Levy, D. Meyer, and A. B. Spierings, “Surface integrity of selective-laser-melted components,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 59, no. 1, pp. 601–606, 2010.
- [16] P. Stavropoulos, P. Foteinopoulos, A. Papacharalampopoulos, and H. Bikas, “Addressing the challenges for the industrial application of additive manufacturing : Towards a hybrid solution,” *Int. J. Light. Mater. Manuf.*, vol. 1, no. 3, pp. 157–168, 2018.
- [17] P. Michalik, J. Zajac, M. Hatala, D. Mital, and V. Fecova, “Monitoring surface roughness of thin-walled components from steel C45 machining down and up milling,” *MEASUREMENT*, vol. 58, pp. 416–428, 2014.
- [18] S. Seguy, G. Desein, and L. Arnaud, “Surface roughness variation of thin wall milling, related to modal interactions,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 48, no. 3–4, pp. 261–274, 2008.
- [19] V. Thevenot, L. Arnaud, G. Desein, and G. Cazenave-Larroche, “Integration of dynamic behaviour variations in the stability lobes method: 3D lobes construction and application to thin-walled structure milling,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 27, no. 7–8, pp. 638–644, 2006.
- [20] Y. Altıntaş and E. Budak, “Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 44, no. 1, pp. 357–362, 1995.
- [21] B. Denkena and C. Schmidt, “Experimental investigation and simulation of machining thin-walled workpieces,” *Prod. Eng.*, vol. 1, no. 4, pp. 343–350, 2007.
- [22] S. Smith, R. Wilhelm, B. Dutterer, H. Cherukuri, and G. Goel, “Sacrificial structure preforms for thin part machining,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 61, no. 1, pp. 379–382, 2012.
- [23] K. Kolluru, D. Axinte, and A. Becker, “A solution for minimising vibrations in milling of thin walled casings by applying dampers to workpiece surface,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 62, no. 1, pp. 415–418, 2013.
- [24] J. Favre, P. Lohmuller, B. Piotrowski, S. Kenzari, P. Laheurte, and F. Meraghni, “A continuous crystallographic approach to generate cubic lattices and its effect on relative stiffness of architected materials,” *Addit. Manuf.*, vol. 21, no. February, pp. 359–368, 2018.
- [25] V. S. Deshpande, N. A. Fleck, and M. F. Ashby, “Effective properties of the octet-truss lattice material,” vol. 49, pp. 1747–1769, 2001.
- [26] Y. Amani, S. Dancette, P. Delroisse, A. Simar, and E. Maire, “Compression behavior of lattice structures produced by selective laser melting: X-ray tomography based experimental and finite element approaches,” *Acta Mater.*, vol. 159, pp. 395–407, 2018.
- [27] A. Moufki, D. Dudzinski, G. Le Coz, “Prediction of cutting forces from an analytical model of oblique cutting, application to peripheral milling of Ti6Al4V alloy ” *International Journal of advanced Manuf Tech*, 81 (1-4), 615-626
1995, pp. 3–6