

Homogénéité des surfaces de pièces obtenues par Fabrication Additive

V. LARIVIERE^{a,b}, R. DELTOMBE^b, A. MONTAGNE^c,
G. VANSTEENKISTE^a, M. BIGERELLE^b

a. AGS Fusion - Groupe AGS

35 route de champ biolay 01580 IZERNORE - France

b. Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielle et Humaine (LAMIH)

CNRS UMR8530, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis

Le Mont Houy 59313 VALENCIENNES Cedex 9 - France

c. Mechanics Surfaces and Materials Processing (MSMP) - Arts et Métiers ParisTech
Centre Arts et Métiers ParisTech 8 boulevard Louis XIV 59046 LILLE Cedex - France

Résumé

La fabrication additive par fusion d'un lit de poudre fait partie des technologies prometteuses dans le domaine de l'impression 3D. Appliquée aux matériaux métalliques, elle se présente comme une technologie de rupture pour l'industrie. Cependant, l'état de surface des pièces générées par ce procédé présente un aspect rugueux qui peut impacter la fonction ou l'apparence de la pièce. La littérature fait principalement état de l'influence de l'angle de l'axe de fabrication d'une pièce fabriquée par procédé additif sur son état de surface, alors que les traitements thermiques couramment utilisés ont aussi un impact sur l'aspect de la pièce. Les auteurs se proposent d'identifier les paramètres les plus influents concernant la rugosité d'une pièce obtenue par fabrication additive. Il apparaît que le traitement thermique employé peut engendrer des variations de l'ordre de 5% de l'amplitude de la rugosité initiale. En revanche l'emploi de poudre recyclée peut amener des variations de l'état de surface pouvant atteindre 20% de l'amplitude de la rugosité initiale au sein d'une seule pièce et 12% entre plusieurs séries de pièces supposées identiques, en moyenne sur la série.

Abstract

Among all the available additive manufacturing process known to date, selective melting of a powder bed is really promising. Applied to metallic parts, this technology has everything to be disruptive. However, the rough aspect of the parts may be repelling to the final user or could impair the parts functionality. Many authors focused on the influence of part orientation on its roughness, but heat treatment tend to affect the part's surface, as well. This work was aimed at identifying the impact of several build and post-build parameters on parts roughness. Although heat treatment induced variations on surface roughness appears to remain below 5%, it has been shown that the use of recycled powder is a source of variation of the roughness that can reach 20% within one single part and 12% between batches, averaged on all parts of the batch.

Mots clefs : Fusion Laser Sélective, Rugosité, Traitement Thermique

1 Introduction

Envisagée comme un moyen de prototypage, la fabrication additive prend de plus en plus de place dans l'industrie. Appliquée aux poudres métalliques, elle se présente comme une technologie de rupture. Cependant, l'aspect rugueux ou irrégulier des pièces obtenues peut être un problème esthétique pour l'utilisateur final ou impacter la fonctionnalité de la pièce, (cas des prothèses orthopédiques) (Schwartz et al., 2005; Sing et al., 2016). Jusqu'à présent, la littérature a considéré l'influence de l'axe de fabrication des pièces produites sur leur état de surface (Pyka et al., 2012; Strano et al., 2013), en considérant des indicateurs simples tels que la rugosité moyenne arithmétique. D'autres auteurs ont observé l'influence des paramètres de pilotage du laser de fabrication (Abele and Kniepkamp, 2015) ou de la taille des poudres (Yadroitsev and Smurov, 2011) sur la rugosité. Du point de vue de l'utilisateur machine, des phénomènes tels que la vitesse de flux de gaz, le déplacement du système d'étalement de poudre ou la répartition des passes de lasage peuvent engendrer des irrégularités de l'état de surface. Cette étude a pour but de cibler les sources de variation de l'état de surface, accessibles au niveau de l'utilisateur machine. Ceci inclut la hauteur de fabrication, l'orientation de la surface étudiée par rapport au flux de gaz, la poudre mise en œuvre et le traitement thermique (Mireles et al., 2015). Des surfaces de 25mm² ont pu être étudiées grâce à des mesures par interférométrie couplées à la méthode du stitching de topographies.

2 Matériel et Méthode

Cette étude a été réalisée sur des pièces en alliage d'aluminium AlSi7Mg06 obtenues par fusion laser sur lit de poudre. Les pièces sont des barreaux à section carrée de 10mm de côté et 70 mm de hauteur, fabriqués perpendiculairement au plateau de fabrication. Afin de s'affranchir des phénomènes de « marches d'escalier », qui augmentent la rugosité des surface inclinées, (Grimm et al., 2015; Yasa et al., 2016), les surfaces étudiées seront uniquement verticales. La proximité des pièces dans l'enceinte pouvant Les effets d'accumulation thermique et suffisamment éloignées les unes des autres pour négliger les effets d'accumulation thermique qui augmentent (Jamshidinia and Kovacevic, 2015).

La machine utilisée est une machine SLM 280 HL, de SLM Solutions GmbH, équipée de deux LASERs YaG de 400W. Le matériau utilisé est la poudre pré-alliée d'AlSi7Mg06, sphéroïdale, de diamètre moyen 50µm, obtenue par atomisation, fournie par SLM Solutions GmbH. La composition chimique de l'alliage est donnée ci-dessous :

Éléments	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
% Masse	Balance	6.5-7.5	0-0.20	0.03	0.10	0.4-0.75	0-0.25	0-0.10

Tableau 1 : composition chimique de l'AlSi7Mg06

Au total, 64 barreaux ont été produits avec deux types de poudres, en 4 séries de pièces résumées dans le Tableau 2. Après production, les barreaux ont été repérés par série et séparés en quatre groupes de pièces destinées à différents types de traitements thermiques :

- REF : un groupe de référence, qui comprend les pièces en l'état sortie machine
- CIC : un groupe qui comprend des pièces ayant subi un cycle de compression isostatique à chaud sous 1000bars à 500°C
- T6 : un groupe qui comprend des pièces qui ont subi un cycle de mise en solution à 530°C, trempe à l'eau puis vieillissement à 180°C
- CT6 : un groupe dont les pièces ont été soumises successivement aux deux mêmes traitements que les groupes précédents, dans l'ordre CIC suivi de T6

Poudre	Neuve		Recyclée	
	Série A	Série B	Série C	Série D
Série	Série A	Série B	Série C	Série D
Nombre de pièces	16	16	16	16
Traitement thermique	REF	REF	REF	REF
	CIC	CIC	CIC	CIC
	T6	T6	T6	T6
	CT6	CT6	CT6	CT6

Tableau 2 : Répartition des échantillons étudiés

Les surfaces considérées dans cette étude ont été mesurées à l'aide d'un interféromètre en lumière blanche Zygo New View 7300, équipé d'un objectif Mirau x20 et d'un zoom x0.5 (résolution optique : $0.71\mu\text{m}$) et d'une caméra CCD 640x480. Les images ont été reconstruites par la méthode du stitching (Deltombe et al., 2014), qui permet de créer une surface étendue de 25mm^2 en assemblant 9×12 topographies.

Les surfaces mesurées sur les différents barreaux ont été réalisées sur les quatre faces des barreaux, identifiées Nord, Sud, Est ou Ouest en fonction de leur orientation par rapport au flux de gaz, représentée Figure 1. Chaque barreau est ensuite divisé en quatre sections de hauteur égale. Chaque section, de chaque face fera l'objet d'une surface étudiée (Tableau 3).

Face	Hauteur
Nord	H1
Sud	H2
Est	H3
ouest	H4

Tableau 3 : Seize surfaces étudiées par échantillon

Dans un premier temps, afin de statuer sur l'homogénéité des surfaces d'une série à une autre et au sein d'une même série, les surfaces « Nord » des 16 éprouvettes du groupe REF seront étudiées. On statuera ainsi sur l'influence de la position de l'éprouvette par rapport au flux de gaz.

Dans un second temps, les quatre faces d'échantillons provenant des quatre groupes seront observées afin d'étudier l'influence de la face mesurée et du traitement thermique sur la rugosité.

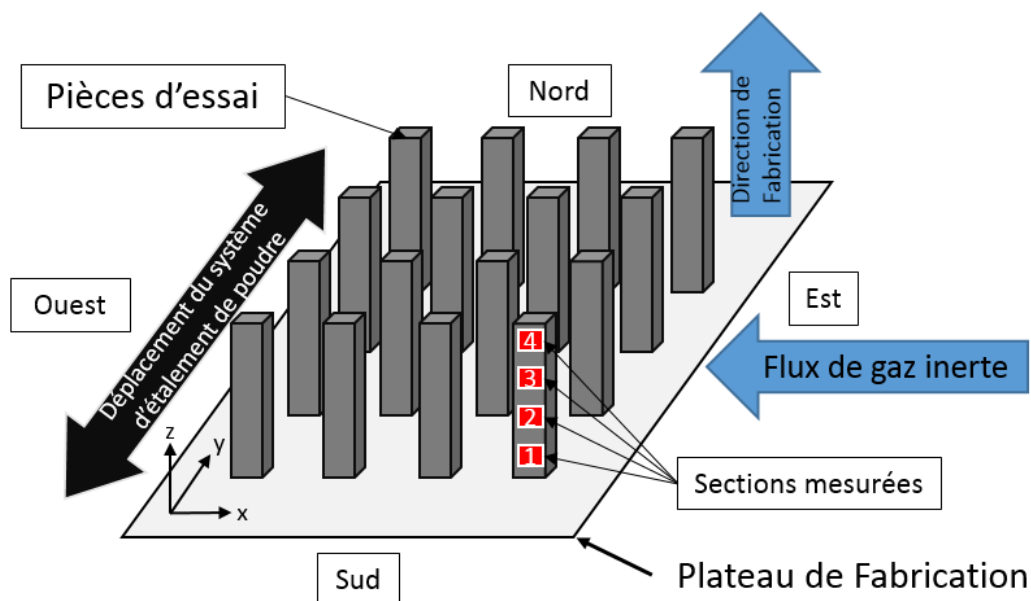


Figure 1 : schéma de l'environnement des surfaces étudiées

3 Résultats

a. Répétabilité

Dans un premier temps, l'étude vise à identifier la répétabilité des surfaces entre plusieurs échantillons d'une même série, puis d'une série à une autre.

Pour cela, on comparera les faces « Nord » de tous les échantillons du groupe de référence, à quatre hauteurs, signalées en orange sur le **Tableau 4**.

Poudre	Neuve		Recyclée	
	Série A	Série B	Série C	Série D
Série	Série A	Série B	Série C	Série D
Nombre de pièces	16	16	16	16
Traitement thermique	REF	REF	REF	REF
	CIC	CIC	CIC	CIC
	T6	T6	T6	T6
	CT6	CT6	CT6	CT6
	Face	Hauteur		
	Nord	H1		
	Sud	H2		
	Est	H3		
	ouest	H4		

Tableau 4 : surfaces étudiées

Chaque série, utilisant un type de poudre, a été répétée une fois, une ANOVA à mesure répétée nous permet d'étudier l'évolution de l'amplitude de la rugosité des faces.

Les surfaces obtenues par fabrication additive présentent une structure pseudo-périodique amortie (Deltombe et al., 2014), d'une longueur caractéristique d'environ 150 μ m (Figure 2), ce qui correspond à la taille caractéristique d'un bain de fusion (Aboulkhair et al., 2016, 2014). On remarque également que les satellites attachés à la surface (Figure 3) sont moins nombreux sur des pièces produites avec de la poudre recyclée (Figure 4). La diminution du nombre de particules de très petites tailles dans la poudre recyclée permet d'expliquer ce changement (Tang et al., 2015).

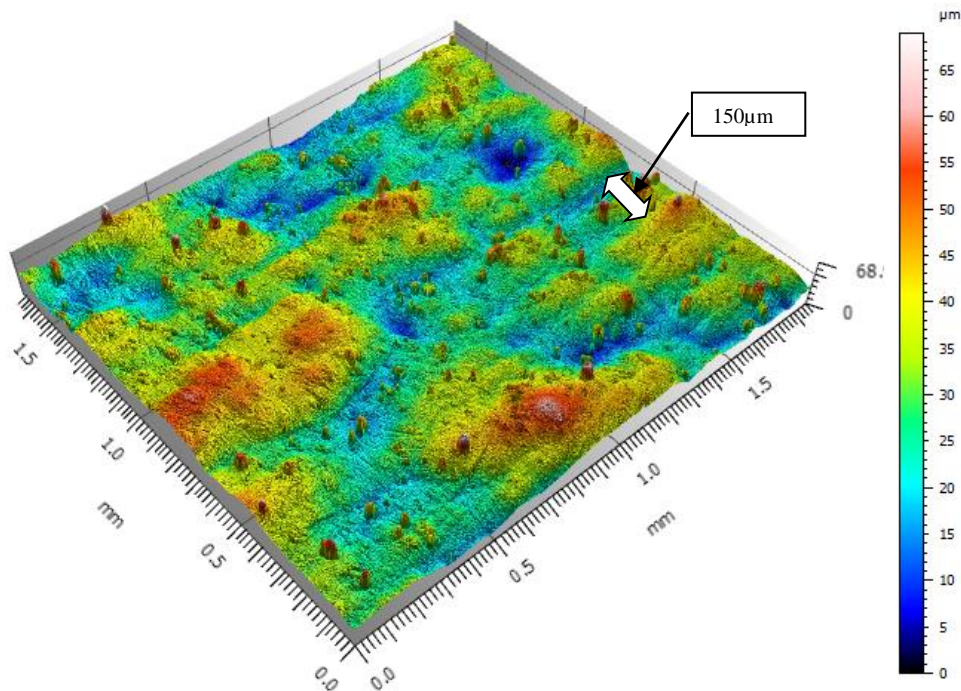


Figure 2 : vue 3D d'une surface de référence, Face Nord, Poudre recyclée

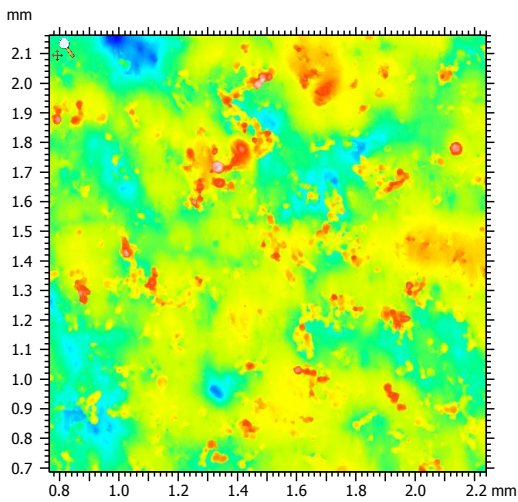


Figure 3 : détail de la surface d'un échantillon de référence, face Nord, poudre vierge

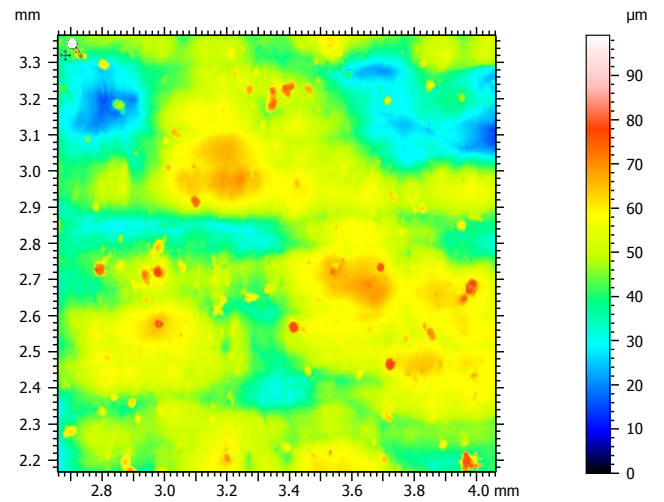


Figure 4 : détail de la surface d'un échantillon de référence, face Nord, poudre recyclée

L'ANOVA à mesures répétées indique un impact significatif de la poudre utilisée sur la rugosité ($pvalue=0.001$) ainsi que sur la répétabilité de l'état de surface entre deux séries ($pvalue<0.001$). La Figure 5 montre que la rugosité varie moins d'une série à une autre pour des poudres vierges (en rouge) que pour des poudres recyclées (en bleu).

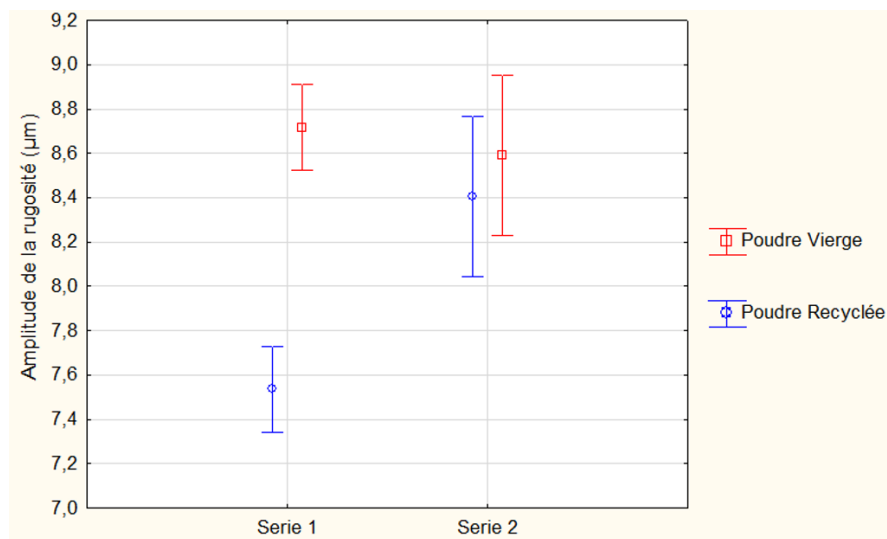


Figure 5 : effet de la poudre utilisée sur la variation de la rugosité entre deux séries

Au cours de la fabrication, l'environnement thermique de la zone fusionnée évolue, et des défauts de mise en couche peuvent apparaître. Ceci peut avoir une incidence sur l'homogénéité de la pièce le long de son axe de fabrication (ici, la hauteur du barreau).

Dans le cas présenté Figure 6 l'effet de la hauteur, repérée par 1 (proche du plateau de fabrication), 2, 3 et 4 (proche de la face supérieure) est visible sur la deuxième série de pièces produites en poudre recyclées.

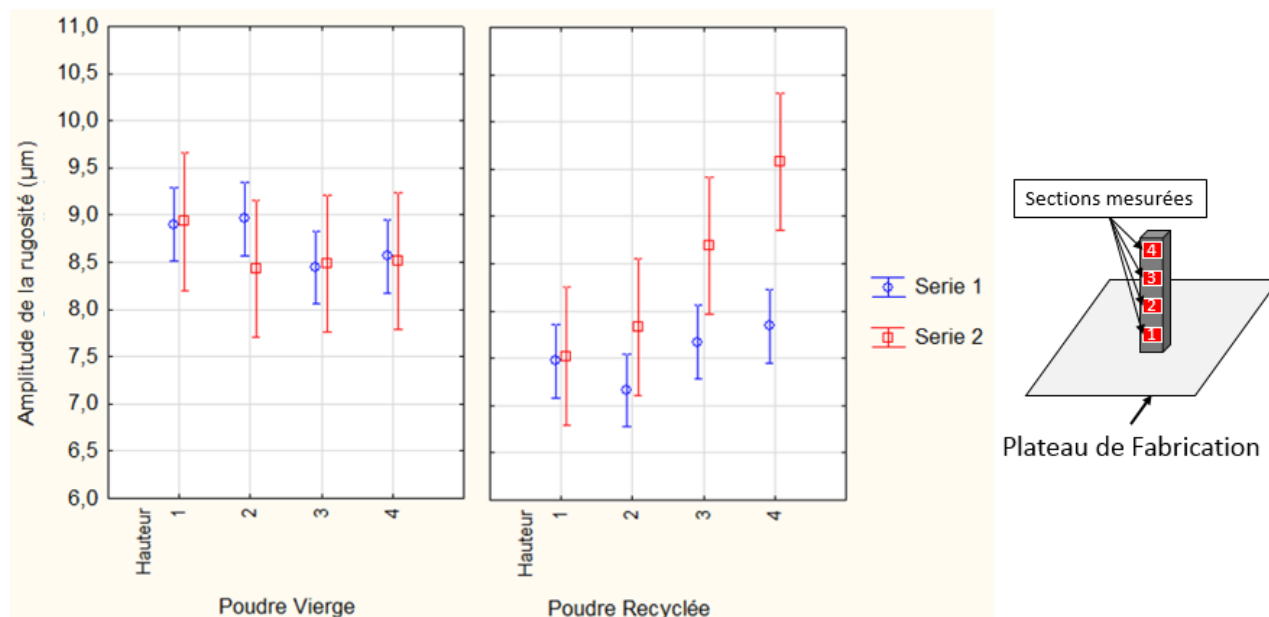


Figure 6 : effet de la poudre utilisée sur la variation de rugosité sur une même pièce

b. Effet du traitement thermique

Les travaux du paragraphe précédent ont permis de statuer sur la répétabilité des surfaces entre les productions, en fonction de la poudre utilisée et en fonction de la hauteur considérée. La reproductibilité des surfaces produites en poudre recyclée n'étant pas satisfaisantes, les résultats qui suivent porteront uniquement sur les éprouvettes produites utilisant de la poudre neuve. Les quatre faces des éprouvettes seront étudiées, repérées Nord, Sud, Est et Ouest, conformément au schéma de la Figure 1. Les éprouvettes proviendront cette fois des quatre groupes de traitement thermique évoqués au paragraphe 2.

L'ANOVA confirme la significativité de l'effet du traitement sur la rugosité des pièces ($pvalue < 0.001$). La variation observée reste de l'ordre de $0.5\mu m$, soit 5% de la rugosité de l'état de référence. L'effet du CIC évoqué dans la littérature (Hosseini et al., 2012) est visible sur la Figure 7, avec une amplitude faible. De même, l'augmentation de l'amplitude de la rugosité attendue après T6 est de l'ordre de 5% de la valeur initiale.

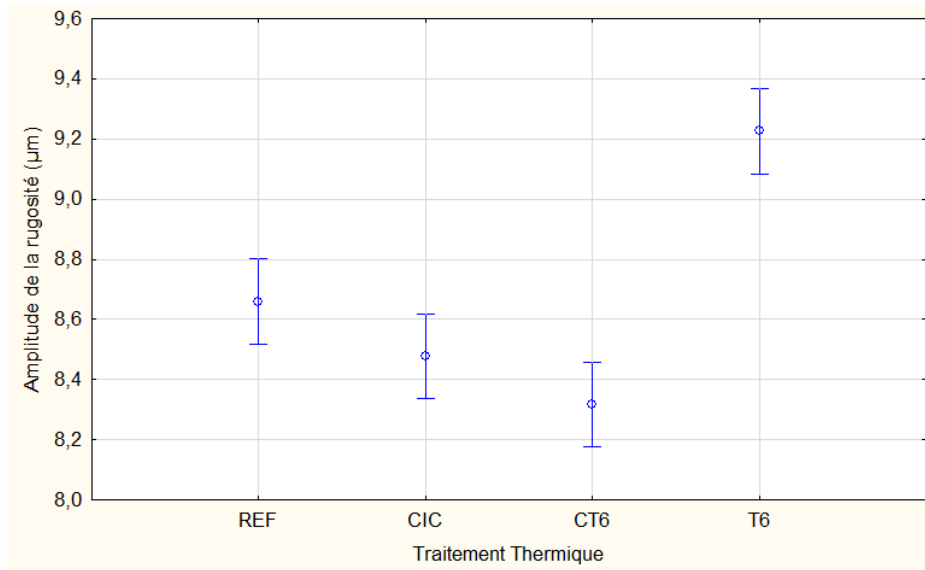


Figure 7 : influence du traitement thermique sur la rugosité

Une ANOVA permet de dire que l'effet de la face observée n'est pas significatif dans notre étude ($p\text{-value} > 0.25$). Les variations observées sur les différentes faces (Figure 8) sont plus faibles que les variations engendrées par le traitement thermique.

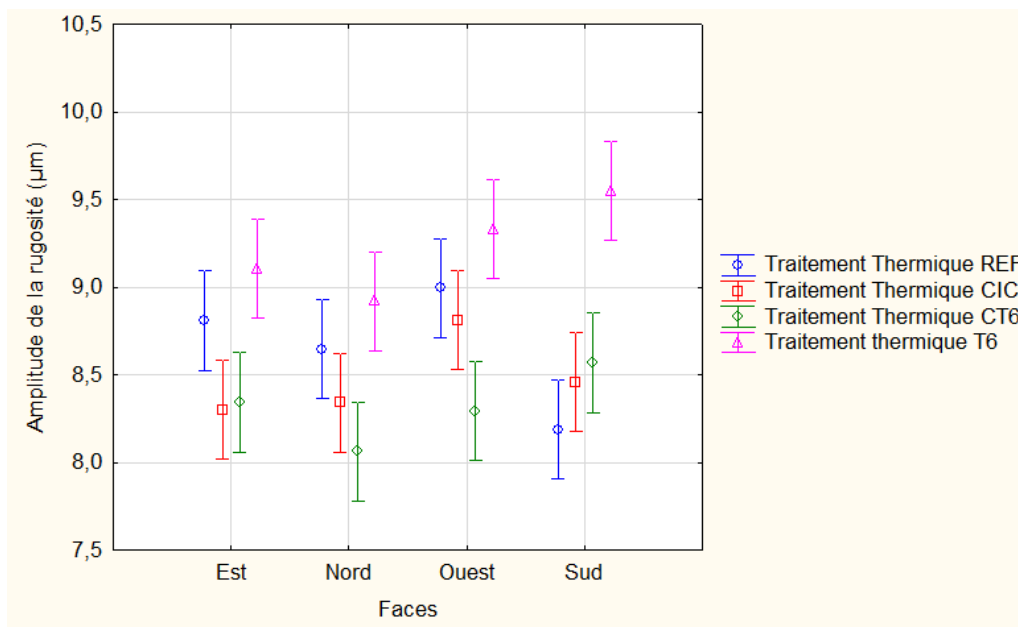


Figure 8 : influence de la face observée sur la rugosité, pour des pièces soumises à différents traitements thermiques

4 Conclusion

Cette étude s'inscrit dans un thème plus vaste d'identification des hétérogénéités générées par le procédé de fusion laser sur lit de poudre métallique. L'aspect original est apporté par le grand nombre d'échantillons qui ont été analysés à l'échelle du dixième de μm , sur des surfaces de plus de 25mm^2 , grâce au stitching de topographies. Ceci a permis d'observer l'influence de plusieurs paramètres sur la variation des surfaces au sein d'une même pièce, ainsi que d'une série de pièces à une autre.

L'effet du traitement thermique sur la rugosité des échantillons mesurés reste limité à des variations de l'ordre de 5%. L'étude de plusieurs séries de pièces révèle que les poudres recyclées peuvent être un facteur de variation entre deux séries pouvant atteindre 12% de la rugosité moyenne de l'échantillon. Cette variation est également visible au sein même d'une pièce où l'amplitude de la rugosité peut varier de 20% sur la hauteur de la pièce.

Les échantillons qui présentent des gradients macroscopiques significatifs de rugosité feront l'objet d'une étude des propriétés mécaniques locales afin de statuer sur l'existence d'un gradient de propriétés mécaniques.

Références

- Abele, E., Kniepkamp, M., 2015. Analysis and optimisation of vertical surface roughness in micro selective laser melting. *Surf. Topogr. Metrol. Prop.* 3, 34007. doi:10.1088/2051-672X/3/3/034007
- Aboulkhair, N.T., Everitt, N.M., Ashcroft, I., Tuck, C., 2014. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Addit. Manuf.* 1–4, 77–86. doi:10.1016/j.addma.2014.08.001
- Aboulkhair, N.T., Maskery, I., Tuck, C., Ashcroft, I., Everitt, N.M., 2016. The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment. *Mater. Sci. Eng. A* 667, 139–146. doi:10.1016/j.msea.2016.04.092
- Deltombe, R., Kubiak, K.J., Bigerelle, M., 2014. How to select the most relevant 3D roughness parameters of a surface. *Scanning* 36, 150–160. doi:10.1002/sca.21113
- Grimm, T., Wiora, G., Witt, G., 2015. Characterization of typical surface effects in additive manufacturing with confocal microscopy. *Surf. Topogr. Metrol. Prop.* 3, 14001. doi:10.1088/2051-672X/3/1/014001
- Hosseini, A.M., Masood, S.H., Fraser, D., Jahedi, M., 2012. Mechanical Properties Investigation of HIP and As-Built EBM Parts. *Adv. Mater. Res.* 576, 216–219. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.576.216
- Jamshidinia, M., Kovacevic, R., 2015. The influence of heat accumulation on the surface roughness in powder-bed additive manufacturing. *Surf. Topogr. Metrol. Prop.* 3, 14003. doi:10.1088/2051-672X/3/1/014003
- Mireles, J., Ridwan, S., Morton, P.A., Hinojos, A., Wicker, R.B., 2015. Analysis and correction of defects within parts fabricated using powder bed fusion technology. *Surf. Topogr. Metrol. Prop.* 3, 34002. doi:10.1088/2051-672X/3/3/034002
- Pyka, G., Burakowski, A., Kerckhofs, G., Moesen, M., Van Bael, S., Schrooten, J., Wevers, M., 2012. Surface Modification of Ti6Al4V Open Porous Structures Produced by Additive Manufacturing. *Adv. Eng. Mater.* 14, 363–370. doi:10.1002/adem.201100344
- Schwartz, Z., Nasazky, E., Boyan, B., 2005. Surface microtopography regulates osteointegration: the role of implant surface microtopography in osteointegration. *Alpha Omegan* 98, 9–19.
- Sing, S.L., An, J., Yeong, W.Y., Wiria, F.E., 2016. Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs. *J. Orthop. Res.* 34, 369–385. doi:10.1002/jor.23075

- Strano, G., Hao, L., Everson, R.M., Evans, K.E., 2013. Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting. *J. Mater. Process. Technol.* 213, 589–597. doi:10.1016/j.jmatprotec.2012.11.011
- Tang, H.P., Qian, M., Liu, N., Zhang, X.Z., Yang, G.Y., Wang, J., 2015. Effect of Powder Reuse Times on Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V by Selective Electron Beam Melting. *JOM* 67, 555–563. doi:10.1007/s11837-015-1300-4
- Yadroitsev, I., Smurov, I., 2011. Surface Morphology in Selective Laser Melting of Metal Powders. *Phys. Procedia, Lasers in Manufacturing 2011 - Proceedings of the Sixth International WLT Conference on Lasers in Manufacturing 12*, 264–270. doi:10.1016/j.phpro.2011.03.034
- Yasa, E., Poyraz, O., Solakoglu, E.U., Akbulut, G., Oren, S., 2016. A Study on the Stair Stepping Effect in Direct Metal Laser Sintering of a Nickel-based Superalloy. *Procedia CIRP* 45, 175–178. doi:10.1016/j.procir.2016.02.068