



HAL
open science

Influence de la vitesse de scan sur la microstructure de murs fins en IN718, produits par dépôt sous énergie concentrée

Michèle Bréhier, Daniel Weisz-Patrault, Christophe Tournier

► To cite this version:

Michèle Bréhier, Daniel Weisz-Patrault, Christophe Tournier. Influence de la vitesse de scan sur la microstructure de murs fins en IN718, produits par dépôt sous énergie concentrée. Conference Manufacturing21, Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay [ENS Paris Saclay], Oct 2022, Gif Sur Yvette, France. hal-04011649

HAL Id: hal-04011649

<https://hal.science/hal-04011649>

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 de la vitesse de scan sur la microstructure de murs fins en IN718, produits par dépôt sous énergie concentrée

Michèle BREHIER^(a,b), Daniel WEISZ-PATRAULT^(b), Christophe TOURNIER^(a)

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

(b) LMS-UMR CNRS 7649 Ecole Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, Palaiseau 91120

Mail : christophe.tournier@ens-paris-saclay.fr

Résumé : les possibilités offertes par la fabrication additive pour la réalisation de pièces de formes complexes en ont fait un procédé largement utilisé depuis plusieurs années. Cependant, le contrôle des propriétés mécaniques des pièces produites en fabrication additive métallique constitue toujours un enjeu de taille. Le comportement mécanique des pièces est lié à leur microstructure, qui dépend des paramètres du procédé et des stratégies de fabrication. La vitesse de scan est l'un des paramètres du procédé qui peut être modulé pour obtenir différentes microstructures. Il est d'autant plus important de connaître l'influence de ce paramètre, que sa variation n'est pas toujours souhaitée, mais dépendante du comportement cinématique de la machine. Dans cette étude, des essais expérimentaux, en Inconel 718, permettent d'évaluer l'influence de la vitesse de scan en dépôt sous énergie concentrée (DED) poudre sur la microstructure. Six murs fins monocordons sont ainsi réalisés, pour des combinaisons de vitesses de scan et de puissances laser différentes. On s'intéresse, dans un premier temps, au lien entre l'aspect extérieur du mur et sa microstructure dans un plan de coupe dans la longueur du mur. Une analyse quantitative portant sur les grains colonnaires permet, ensuite, d'évaluer l'influence de la vitesse de scan et de la puissance sur la taille, la forme et l'inclinaison de ces grains. Ce travail préliminaire ouvre la voie, à long terme, à un meilleur contrôle de la microstructure.

Mots-clés : DED poudre, microstructure, vitesse de scan.

1 Introduction

La fabrication additive permet la production de pièces complexes et est largement utilisée depuis plusieurs années. Parmi les différents procédés de fabrication additive métallique, le dépôt de matière sous énergie concentrée (DED) est considéré dans cette contribution, plus précisément le DED poudre métallique par laser (LMP-DED) également appelé dépôt métallique à laser (LMD). Parmi tous les paramètres du procédé, seuls deux seront considérés dans cet article : la vitesse de scan et la puissance du laser. Les propriétés mécaniques des pièces produites par la fabrication additive métallique dépendent considérablement de divers aspects qui doivent être contrôlés, tels que la porosité (Montazeri, 2020), l'absence de défauts de fusion (Margerit, 2021), les contraintes résiduelles (Weisz-Patrault, 2022), etc. Cependant, cet article se concentre principalement sur les microstructures. En effet, l'un des principaux défis pour améliorer le procédé est de mieux contrôler les microstructures, soit pour en assurer l'homogénéité, soit au contraire pour introduire volontairement des gradients ciblés.

La microstructure communément rapportée dans la littérature consiste en des grains allongés orientés le long de la direction de construction avec parfois de petits grains équiaxes entre chaque couche (Balit, 2020). Plusieurs études examinent comment cette microstructure standard est affectée par des modifications des paramètres du processus. Par exemple, (Parimi, 2014) a montré que la taille et l'orientation des grains dépendent de l'énergie linéaire, définie comme la puissance du laser divisée par la vitesse de scan. En augmentant la puissance du laser, les grains deviennent plus gros et moins inclinés par rapport à la direction de construction. Dans le cas d'une énergie linéaire élevée, on observe des grains continus traversant les interfaces des couches. (Cao, 2013) a étudié l'influence du taux de recouvrement sur la largeur des grains en imposant des variations de 20 à 50 %. (Guévénoux, 2020) a comparé les cartes obtenues par diffraction d'électrons rétrodiffusés (EBSD) avec et sans temporisation entre chaque couche. Il a été constaté que la temporisation est associée à une structure de grain plus fine et à une texture cristallographique plus forte. Concernant la stratégie de balayage, il en existe plusieurs en fabrication additive DED, les plus couramment utilisées étant les trajectoires unidirectionnelles ou en zigzag car elles sont faciles à mettre en œuvre. Cependant, elles peuvent conduire à une mauvaise qualité de surface sur les bords qui ne sont pas parallèles à la trajectoire de dépôt. Pour surmonter cette difficulté, des stratégies de contour ou hybrides peuvent être envisagées. (Ribeiro, 2020) a comparé les stratégies raster, zigzag, damier et spirale et a montré que la stratégie de dépôt avait un impact non seulement sur la planéité et la rugosité, mais aussi sur la porosité et les microstructures. Quelle que soit la stratégie de balayage, le problème des variations de vitesse subies au cours du processus doit également être abordé. (Duong, 2019) a montré que la vitesse de scan programmée n'est pas toujours respectée, notamment sur les points tournants et lorsque la machine s'arrête et repart pour rester synchronisée avec l'état du laser. La cinématique de la machine entraîne donc des variations indésirables de la vitesse de la buse, ce qui pourrait avoir un impact sur la microstructure. Ainsi, la vitesse de scan, qui peut évoluer le long de la trajectoire de balayage, est un paramètre dont l'influence sur la microstructure doit être contrôlée. De plus, au-delà du procédé LMD, la variabilité de la vitesse de balayage, programmée ou subie, est un problème transversal à tous les procédés DED.

L'objectif de ce travail est, dans un premier temps, de s'intéresser au type de microstructure obtenue pour différentes valeurs de vitesse de scan, en lien avec la puissance laser, sur des murs fins monocordons. À la suite de considérations générales, l'analyse quantitative portant sur les grands grains colonnaires permettra d'évaluer principalement l'influence de la vitesse ainsi que d'autres paramètres complémentaires sur leur taille, forme et inclinaison.

2 Plan d'expérience

Les essais ont été réalisés sur une machine BeAM 5 axes équipée d'une buse coaxiale de type 10Vx (figure 1.a) comportant un flux de poudre, un inertage local à l'argon et une source laser à fibre IPG de 500 W. La plage de travail de cette buse est de 200-400 W. La poudre utilisée est de l'IN 718. Pour évaluer l'influence de la vitesse, on a travaillé sur une géométrie simple de murs monocordons pour différentes valeurs de puissance et de vitesse et un débit constant de 9 g/min (figure 1.b). Plus précisément, un total de six murs fins de 40 mm de long et 30 mm de haut ont été produits selon le plan d'expérience présenté sur la figure 2. Trois ensembles de murs avec des vitesses de scan croissantes peuvent être identifiés : deux ensembles avec une puissance laser constante (c'est-à-dire 250 W pour les murs 1, 4 et 6 et 350 W pour les murs 3 et 5) et un ensemble avec une énergie linéaire constante (8 J/mm pour les murs 1, 2 et 3). En outre, toutes les expériences ont été menées avec une stratégie unidirectionnelle sur le même substrat. Un temps d'arrêt de 0,5 s a été appliqué entre chaque couche, nécessaire pour le rallumage du laser. Concernant l'incrément Z, celui-ci a été adapté pour chaque mur et fixé à la hauteur du cordon correspondant à cette paramétrie moins 0,03 mm. C'est un plan d'expérience préalable sur des cordons qui a motivé ces choix de paramétrie.

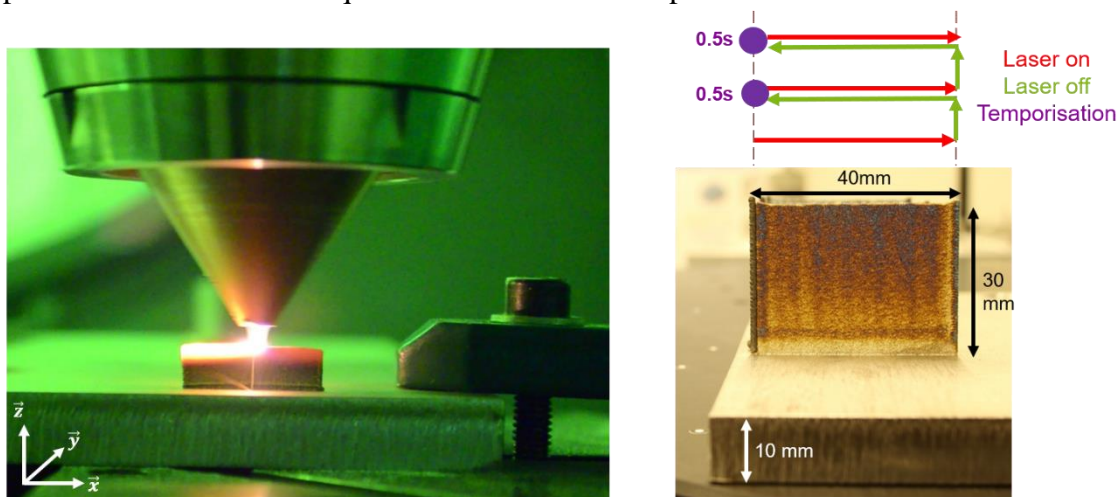


Figure 1 : (a) Photo du processus de fabrication d'un mur. (b) Dimensions des murs et stratégie de fabrication

Une fois les murs fabriqués, une analyse macroscopique et topographique (Bréhier, 2022) a mis en évidence une diversité dans l'empilement des cordons qui ont pu être classés en trois catégories :

- Empilement les uns sur les autres (murs 1 et 4) ;
- Empilement en quinconce (murs 2 et 6) ;
- Empilement sans schéma simple (murs 3 et 5).

Ce phénomène est à prendre en compte dans l'analyse de la microstructure dans un plan et c'est donc par cela que va débuter l'analyse microscopique de la partie suivante.

Débit : 9 g/min

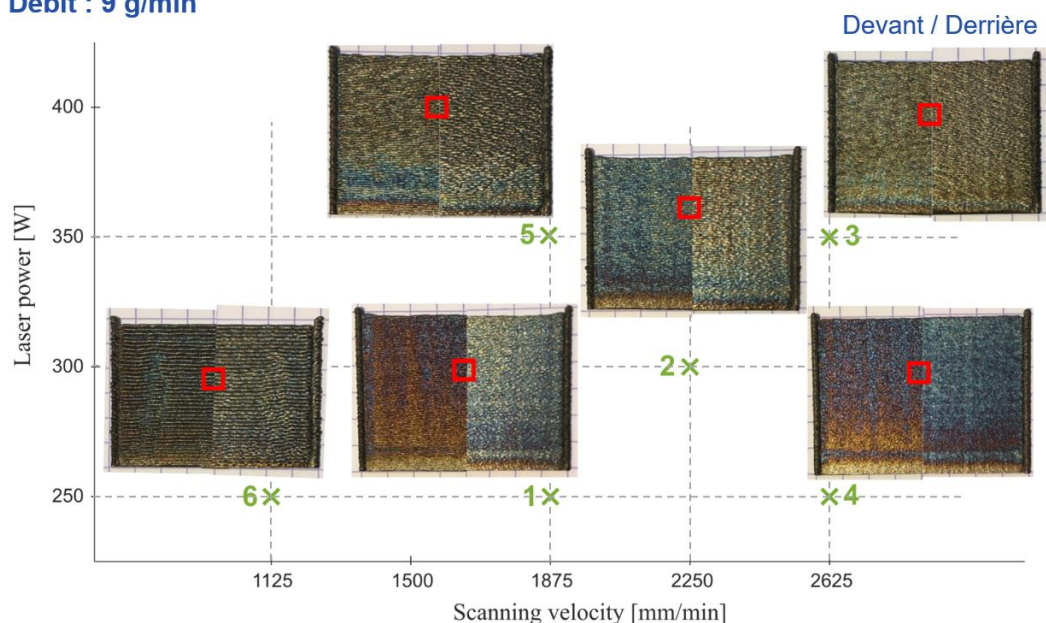


Figure 2 : (a) Plan d'expérience dans le diagramme P, V . Les deux faces de chaque mur sont présentées. (b) Schéma des dimensions des murs et stratégie de fabrication

3 Analyse des microstructures observées

3.1 Considérations générales

L'analyse de la microstructure est faite à partir de cartographies EBSD sur la zone encadrée en rouge (figure 2) au centre des murs et à une hauteur suffisante pour avoir atteint un régime thermique stable. On peut d'ailleurs observer sur les murs de la figure 2 la zone de transition entre le transfert de chaleur par conduction vers le substrat (non préchauffé) et le régime stabilisé avec des pertes par radiation. Les échantillons extraits ont été préparés par polissage miroir et attaque électrolytique à l'acide orthophosphorique. Le microscope électronique à balayage utilisé dans cette étude pour l'analyse EBSD est le modèle FEI Quanta 600 FEG-ESEM. Les cartes EBSD ont été acquises à l'aide du logiciel Aztec, puis les données ont été analysées avec le logiciel Channel 5 pour tracer les cartes EBSD. L'identification de chaque grain a été obtenue après avoir imposé un seuil de désorientation de 10° , pour la définition des joints de grains.

3.1.1 Lien avec la topographie de surface

Les microstructures observées correspondent à ce que l'on peut trouver dans la littérature. On a effectivement des grains colonnaires orientés suivant la direction de fabrication et séparés par une bande de petits grains équiaxes (figure 2). En revanche, quelle que soit la paramétrie, très peu de grains traversent une couche. Ainsi, les différentes couches sont systématiquement clairement identifiables. On peut alors comparer les images des surfaces des murs prises avant polissage avec la carte EBSD de la zone correspondante (figure 3). Une très bonne concordance entre les deux peut être faite et ce quel que soit le

type d'empilement de cordons. La taille des couches ainsi que leur forme, même non régulière se retrouvent sur la microstructure.

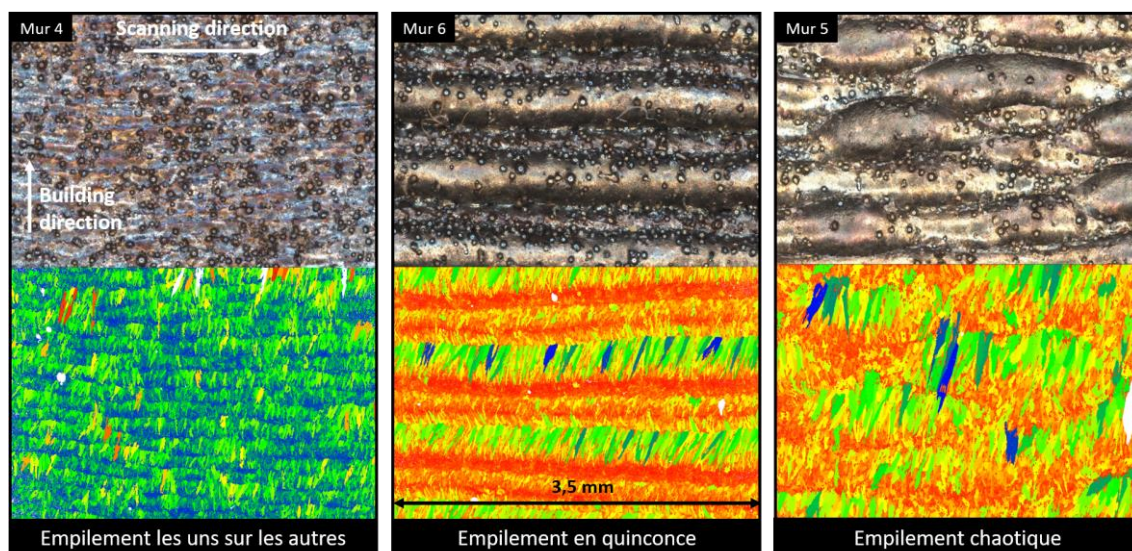


Figure 3 : Images de la surface du mur et cartes EBSD de la microstructure correspondante pour les trois types d'empilement de cordons (les couleurs des cartes EBSD correspondent à la taille des grains)

Si les différentes couches sont distinguables, les microstructures semblent différentes en fonction des couches, notamment pour les cas des empilements en quinconce et chaotique. La raison d'une telle observation est présentée en figure 4. Sur ce schéma, on voit qu'en fonction de la position de la coupe dans la tranche d'un cordon (a), la morphologie des grains est différente. Au centre, les grains sont colonnaires, de la taille d'au moins une couche. Mais, si on se décale de 0,1 mm, le même décalage que celui observé sur le mur 6, les grains deviennent moins elliptiques et plus petits.

Ces observations sont donc cohérentes avec les EBSD des murs qui présentent un empilement en quinconce des cordons (b). La couche de grands grains colonnaires correspondrait au milieu du cordon (plan de coupe vert) et celle de grains moyens plus ronds, à une coupe décalée du milieu (plan de coupe orange sur la figure 4(a)). De manière analogue, on peut expliquer l'EBSD obtenue pour un empilement chaotique, comme un ensemble d'EBSD faits dans des plans de coupe différents du cordon.

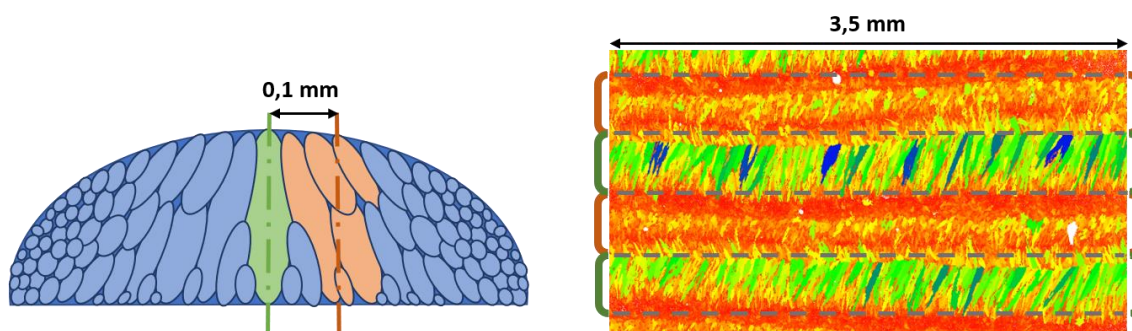


Figure 4 : Schéma de la microstructure d'un cordon en coupe transversale (a) et lien avec la microstructure observée pour le mur 6, présentant un empilement en quinconce(b)

Le lien entre la topographie du mur et sa microstructure est établi en fonction de la position du plan dans lequel est réalisée la mesure. Ce lien est possible car contrairement à ce qui a pu être observé dans la littérature (Parimi, 2014 ; Guévenoux, 2020), on n'observe pas de grains traversant les couches, même pour des puissances et énergies élevées. Les murs de Guévenoux ayant été réalisés sur la même machine et avec le même matériau, ils sont plus propices à la comparaison. La différence majeure réside dans le choix de la trajectoire et temporisation qui va modifier le temps entre deux passages du laser pour un même point du mur. Avec la stratégie unidirectionnelle que nous avons choisie, le laser met le même temps en chaque point pour repasser, ce qui n'est pas le cas de la stratégie bidirectionnelle de Guévenoux. Cependant, en comparant les temps entre deux passages du laser dans les deux cas et du fait que les analyses EBSD ont été réalisées au milieu des murs, les deux configurations expérimentales sont comparables concernant les temps de passage. Ce seul paramètre ne permet donc pas d'expliquer le fait que les grains ne traversent pas les couches. En revanche, lorsqu'on fabrique en unidirectionnel, on repasse au-dessus du mur, laser éteint, mais en continuant à projeter de la poudre. Localement, le passage de la buse sur son trajet de retour va donc refroidir la zone. Le passage de la buse, laser éteint, agit comme un refroidissement actif qui vient s'ajouter au refroidissement naturel entre deux passages de buse (Weisz-Patrault, 2020). Ce phénomène permet d'expliquer le fait que les grains ne traversent pas les couches et apparaît comme un levier majeur pour la maîtrise de la microstructure.

3.1.2 Texture

Concernant la texture des différents murs, les figures de pôles inverses (IPF) montrent une légère prédominance des couleurs rouges selon la direction de fabrication correspondant à la direction (100) des cristaux par rapport à la direction de fabrication, ce qui est confirmé par les figures de pôles. Tous les murs présentant des figures de pôles similaires, seule celle du mur 2 ($P=300$ W et $V=2250$ mm/min) est donnée en figure 5. Ainsi, on a une orientation cristalline préférentielle des grains colonnaires parallèle aux plans (100). En revanche, on parlera de pièces faiblement texturées, étant donné les valeurs maximales de densités, comprises entre 3 et 5,5x random en fonction des murs. Avec des grains plus grands et traversant les couches, on s'attendrait à avoir un résultat plus texturé. Dans notre cas, de nouveaux grains colonnaires se reforment à partir des petits grains équiaxes orientés aléatoirement entre chaque couche.

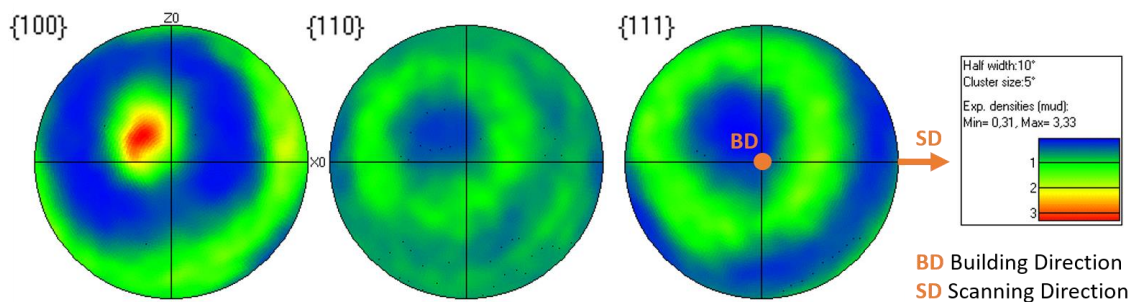


Figure 5 : Figures de pôles du mur 2 de paramétrie : $P=300$ W et $V=2250$ mm/min

3.2 Analyse quantitative

L'analyse des EBSD, ne porte pas directement sur les grains mais sur des ellipses associées par le logiciel de traitement. Ainsi, à chaque grain est associée une ellipse définie par les paramètres suivants : aire de l'ellipse, diamètre équivalent, coordonnées (X, Y) du centre, grand axe de l'ellipse, ratio entre les deux axes de l'ellipse, et inclinaison du grand axe par rapport à l'horizontale.

3.2.1 Définition des grands grains

Pour pouvoir analyser les grands grains colonnaires, il faut trouver un critère pour les distinguer des petits grains équiaxes. Si plusieurs critères peuvent être envisagés, celui qui a été retenu porte sur la taille du grand axe de l'ellipse. Plutôt que de fixer une valeur limite de taille de l'ellipse commune à tous les murs, le critère est adapté à chaque mur. La solution qui a été retenue est donc de définir un grand grain comme un grain dont la taille du grand axe de l'ellipse associée est supérieure à la hauteur d'une demi-couche. Ici, la hauteur de couche correspond à la valeur du Z-incrément. Ce choix se justifie par le fait que les grains traversent peu ou pas les couches et que la hauteur des couches est très différente selon les paramétries.

On constate alors des proportions différentes de nombre de grands grains en fonction des murs, variant entre 1% et 5,8% de la totalité des grains. La vitesse de scan ainsi que la puissance du laser semblent avoir une influence sur cette valeur. Ainsi, plus la vitesse et/ou la puissance est élevée, plus la proportion numéraire des grands grains est importante. Il faut garder en tête que ces résultats sont valables dans le cas où les grains ne traversent pas (ou très peu) les couches, ce qui explique aussi la très grande quantité de petits grains, quel que soit le mur considéré. Les résultats seraient sûrement différents dans le cas de grains traversants.

3.2.2 Taille et forme des grains

On s'intéresse maintenant à la taille et la forme des grands grains en considérant les valeurs moyennes des paramètres pour les différents murs (tableau 1).

Tableau 1 : Moyennes des caractéristiques des grains pour les différentes paramétries

	Mur 1	Mur 2	Mur 3	Mur 4	Mur 5	Mur 6
Puissance (W)	250	300	350	250	350	250
Vitesse (mm/min)	1875	2250	2625	2625	1875	1125
Hauteur de couche (µm)	290	257	177	168	251	421
Taille grand axe (µm)	198	187	143	118	206	272
Taille (% couche)	68	73	81	70	82	65
Taille petit axe (µm)	32	28	37	24	43	32
Ratio	7,3	7,9	4,4	5,8	5,7	9,4
Aire (mm²)	5256	4616	4952	2431	7361	6891

- **Hauteur des grains, définie par la taille du grand axe** : on constate une influence importante de la vitesse et moindre de la puissance. Ainsi, pour une même puissance de 250 W (murs 6, 1 et 4), la taille moyenne des grands grains diminue en augmentant la

vitesse, passant de 272 μm à 118 μm . De même, pour une puissance de 350 W (murs 5 et 3), lorsque la vitesse augmente la taille diminue. Pour une vitesse donnée, l'augmentation de la puissance (murs 1 et 5 ; murs 4 et 3), l'augmentation de la taille des grains est plus faible.

Comme les grains ne traversent pas les couches, la taille des grains est à considérer aussi par rapport à la taille des couches. Si on classe les murs selon la taille moyenne de grains décroissante (6-5-1-2-3-4), l'ordre de celui des hauteurs de couche (6-1-2-5-3-4) est légèrement différent. Ces différences n'excluent pas un lien important entre la hauteur de couche et la taille des grains, puisqu'elles concernent des murs (1-2-5) ayant des valeurs de taille de grains assez proches. En considérant le rapport entre la taille des grains et la taille des couches pour les différents murs, on observe une corrélation assez forte avec la puissance. Cette observation est en adéquation avec les résultats de la littérature (Parimi, 2014), en augmentant la puissance, les grains se rapprochent de la taille d'une couche. En extrapolant, on pourrait imaginer que des puissances encore plus importantes permettraient d'avoir des grains qui traversent les couches.

- **Largeur des grains, définie par la taille du petit axe** : augmente avec la puissance dans les essais réalisés. Plus la puissance augmente, plus la structure est globalement chaude et donc le taux de refroidissement diminue. Or, usuellement la largeur des grains dépend du taux de refroidissement. Celui-ci s'exprime comme l'intensité du gradient thermique multiplié par la vitesse du front de solidification, qui est proportionnel à la vitesse de scan. Ainsi, plus le taux de refroidissement est faible et plus la largeur est importante. Ceci résulte de la croissance compétitive des dendrites qui forment les grains en fonction de leur orientation cristalline par rapport à la direction du gradient thermique.
- **Ellipticité des grains, définie par le ratio** : correspond au rapport de la hauteur sur la largeur des grains, on observe une influence de la vitesse et de la puissance conformément à ce qui a été décrit précédemment. Il faut diminuer la vitesse et la puissance pour augmenter l'ellipticité des grains. De fait, c'est pour le mur 6 ayant la plus petite vitesse et la plus petite puissance, que le ratio est le plus important. A l'inverse, pour le mur 3, de plus grande puissance et vitesse, le ratio est plus de deux fois plus petit.
- **Aire des grains, définie par l'aire de l'ellipse** : proportionnelle au produit de la hauteur et de la largeur des grains, l'influence de la vitesse et de la puissance est visible. Ainsi en augmentant la vitesse, l'aire des grains diminue et en augmentant la puissance, elle augmente. Ainsi, augmenter l'énergie linéique permet d'obtenir des grains plus gros.

3.2.3 Inclinaison des grands grains colonnaires

Sur tous les murs étudiés, les grands grains sont dirigés selon la direction de fabrication conformément à la littérature, et légèrement inclinés suivant le sens de déplacement du laser, formant un angle de moins de 90° avec le substrat ou l'horizontale. La valeur moyenne de cette inclinaison diffère en fonction des murs et semble être liée à la vitesse. Ainsi, en diminuant la vitesse, les grains forment un angle plus petit avec le substrat. Une division de la vitesse par 2,3 permet de diminuer l'angle avec le substrat de 10 degrés et de diviser l'écart type par 2. On passe ainsi de 69° pour le mur 6 (P=250 W, V=1125 mm/min) à 81° pour le 4 (P=250 W, V=2625 mm/min). En effet, les grains s'orientent suivant le gradient thermique. Or, ce dernier est orienté perpendiculairement

au front de solidification, au niveau du bain de fusion. Lorsque la vitesse diminue, le bain de fusion est plus profond, le front est alors plus vertical et donc le gradient plus horizontal. De plus, lorsque la vitesse est plus faible cela implique des passages du laser plus espacés en temps à une position donnée laissant davantage de temps à la structure pour refroidir ce qui est connu pour diminuer l'angle avec le substrat (Guévenoux, 2020).

3.3 Bilan de l'influence de la vitesse et autres paramètres du procédé

Des liens entre les caractéristiques principales des grains et les paramètres du procédé ont été détaillés précédemment. Il s'agit à présent de quantifier la significativité statistique des régressions linéaires réalisées pour chaque paramètre pris indépendamment. À la vitesse, sont ajoutées la puissance et l'énergie linéique (P/V). Ainsi la valeur de la probabilité de la régression linéaire, si elle est inférieure à 0,05 donne un argument de poids pour affirmer que les changements de notre variable explicative entraînent des changements de nos caractéristiques de grains. On déduit de cette analyse que :

- La vitesse est un prédicteur significatif de la taille des grains et de leur inclinaison.
- La puissance est un prédicteur significatif de la taille relative des grains par rapport à la hauteur des couches.
- L'énergie est un prédicteur significatif de la taille et de l'aire moyennes des grains.

L'ensemble de ces informations est résumé dans le tableau 2. La flèche vers le haut signifie qu'une augmentation de la variable entraîne une augmentation de la grandeur mesurée et inversement pour celle vers le bas. Les cases de couleurs plus pâles indiquent une tendance qui mériterait davantage d'essais pour être vérifiée.

Tableau 2 : Influence des paramètres du procédé sur les caractéristiques des grains

	Vitesse (m/min)	Puissance (W)	Energie (mJ/mm)
Hauteur (μm)	↓	X	↑
Hauteur relative (%)	X	↑	X
Largeur (μm)	X	↑	X
Aire (μm^2)	↓	X	↑
Ellipticité	↓	X	X
Inclinaison ($^\circ$)	↑	X	X

4 Conclusion

L'étude proposée dans cet article avait pour objectif de modifier la microstructure en faisant varier la vitesse de scan, à puissance ou à énergie linéique constante. Celle-ci montre qu'il est possible de faire varier dans une certaine mesure quasiment toutes les caractéristiques des grands grains mais pas de manière indépendante. Il faudra par exemple être attentif au fait que la modification de la vitesse, pour augmenter la taille des grains par exemple, aura aussi une conséquence sur leur l'inclinaison. De plus, un certain nombre d'éléments sont à garder en tête lors de la lecture et de l'utilisation de ces résultats. Premièrement, selon la paramétrie et la stratégie de lasage utilisée, les grains ne traversent pas les couches. Par ailleurs, l'analyse porte uniquement sur les grands grains, définis par

un critère que nous avons fixé. Enfin, au-delà de la vitesse de scan, le temps de pause et la taille de la pièce sont aussi des paramètres à prendre en considération du fait de leur influence sur l'accumulation de chaleur de la pièce. A court terme, il s'agira d'observer des différences de microstructure plus importantes en explorant des niveaux d'énergie plus élevés et d'opter pour une stratégie bidirectionnelle.

Remerciements

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet MIFASOL et est soutenu par une subvention de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-20-CE10-0009).

Références

- Y. Balit, E. Charkaluk, A. Constantinescu (2021) Digital image correlation for microstructural analysis of deformation pattern in additively manufactured 316L thin walls, *Additive Manufacturing*, vol 31, pp. 100862.
- M. Bréhier, D. Weisz-Patrault, C. Tournier (2022) Revisiting the influence of the scanning speed on surface topography and microstructure of IN718 thin walls in directed energy deposition additive manufacturing, *Procedia CIRP*, vol 108, pp. 470-476.
- J. Cao, F. Liu, X. Lin, C. Huang, J. Chen, W. Huang (2013) Effect of overlap rate on recrystallization behaviors of laser solid formed inconel 718 superalloy, *Optics & Laser Technology*, vol 45, pp. 228–235.
- U. De Oliveira, V. Ocelik, J. T. M. De Hosson (2005) Analysis of coaxial laser cladding processing conditions, *Surface and Coatings Technology*, vol 197, pp. 127–136.
- T.-Q. Duong, N. Ferrier, S. Lavernhe, C. Tournier (2019) A kinematic simulation software for additive manufacturing metal deposition processes, *ICWAM'19, International Congress On Welding, Additive Manufacturing And Associated Non Destructive Testing*.
- H. El Cheikh, B. Courant, J.-Y. Hascoët, R. Guillén (2012) Prediction and analytical description of the single laser track geometry in direct laser fabrication from process parameters and energy balance reasoning, *Journal of materials processing technology*, vol 212, pp. 1832–1839.
- C. Guévenoux, S. Hallais, A. Charles, E. Charkaluk, A. Constantinescu (2020) Influence of interlayer dwell time on the microstructure of inconel 718 laser clad components, *Optics & Laser Technology*, vol 128, pp. 106218.
- P. Margerit, D. Weisz-Patrault, K. Ravi-Chandar, A. Constantinescu (2021) Tensile and ductile fracture properties of as-printed 316L stainless steel thin walls obtained by directed energy deposition, *Additive Manufacturing*, vol 37, pp. 101664.
- M. Montazeri, A. R. Nassar, A. J. Dunbar, P. Rao (2020) In-process monitoring of porosity in additive manufacturing using optical emission spectroscopy, *IISE Transactions*, vol 52, no 5, pp. 500-515.
- L. L. Parimi, G. Ravi, D. Clark, M. M. Attallah (2014) Microstructural and texture development in direct laser fabricated in718, *Materials Characterization*, vol 89, pp. 102–111.
- K. S. Ribeiro, F. E. Mariani, R. T. Coelho (2020) A study of different deposition strategies in direct energy deposition (ded) processes, *Procedia Manufacturing*, vol 48, pp. 663–670.
- D. Weisz-Patrault (2020) Fast simulation of temperature and phase transitions in directed energy deposition additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, vol 31, pp. 100990.
- D. Weisz-Patrault, P. Margerit, A. Constantinescu (2022) Residual stresses in thin walled-structures manufactured by directed energy deposition: in-situ measurements, fast thermo-mechanical simulation and buckling, *Additive Manufacturing*, pp. 102903.