



**HAL**  
open science

# Étude de la génération des topographies de surfaces latérales issues du procédé LPBF pour un alliage d'aluminium AlSi10Mg

Elina Masiagutova

► **To cite this version:**

Elina Masiagutova. Étude de la génération des topographies de surfaces latérales issues du procédé LPBF pour un alliage d'aluminium AlSi10Mg. Autre. Université de Lyon, 2022. Français. NNT : 2022LYSEE002 . tel-04284890

**HAL Id: tel-04284890**

**<https://theses.hal.science/tel-04284890>**

Submitted on 14 Nov 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.



CENTRALE LYON  
**ENISE**

N° d'ordre NNT : 2022LYSEE002

## THÈSE DE DOCTORANT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

Opérée au sein de l'Ecole centrale de Lyon

Ecole Doctorale N° 488  
Sciences Ingénierie Santé

Spécialité de doctorat :  
Mécanique et ingénierie

Soutenue publiquement le 11/07/2022, par :

**Elina MASIAGUTOVA**

*Préparée au Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes - UMR CNRS 5513*

---

Étude de la génération des topographies de surfaces latérales issues du  
procédé LPBF pour un alliage d'aluminium AlSi10Mg

---

Devant le jury composé de :

M. Hanlin LIAO	Professeur	UTBM	Président, Examineur
M. Clément KELLER	Professeur	Universités de l'ENI de Tarbes	Rapporteur
Mme. Sylvie CASTAGNE	Maître de Conférences HDR	Université catholique de Louvain	Rapporteur
M. Philippe BERTRAND	Professeur	Ecole Centrale de Lyon	Directeur de thèse
M. Frédéric CABANETTES	Maître de conférences	Ecole Centrale de Lyon	Co-encadrant
M. Alexey SOVA	Maître de conférences	Ecole Centrale de Lyon	Co-encadrant



# Remerciements

---

Cette thèse a été réalisée au sein du Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS) de l'École Centrale de Lyon dans le cadre du projet FUI 3D Hybride. Je tiens tout d'abord à remercier la Direction Générale des Entreprises (DGE), la Banque Publique d'Investissement (Bpifrance), la Région Auvergne-Rhône-Alpes et Saint-Etienne Métropole pour le soutien financier pour ce projet. Par ailleurs, je tiens à remercier les partenaires du projet (GIE Manutech USD, Lifco, Ireis, WeAre Tech, Safran, Ecole des Mines de Saint-Etienne et Université Jean Monnet).

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse Philippe BERTRAND qui a été mon tuteur tout au long de mon Master et a ensuite supervisé ma thèse durant ces cinq années. Il m'a permis de trouver la meilleure suite à mon expérience et à mes connaissances scientifiques. Je vous remercie de votre confiance et de votre soutien.

Je souhaite remercier mes co-encadrants Frédéric CABANETTES et Alexey SOVA pour tout le temps qu'ils m'ont consacré, en me donnant des conseils et en me guidant dans mes recherches. Vous m'avez permis de progresser dans un contexte scientifique, expérimental et personnel. Je voudrais également remercier Frédéric CABANETTES pour la qualité de nos échanges surtout sur la modélisation numérique.

Je remercie aussi l'ensemble du jury et, particulièrement Hanlin LIAO, Clément KELLER, Sylvie CASTAGNE qui m'ont fait l'honneur d'évaluer mon travail de thèse.

Ce mémoire est avant tout le résultat d'un travail d'équipe, j'espère donc ne pas oublier ceux qui y ont contribué. J'adresse mes remerciements à l'équipe du LTDS et particulièrement, Mehmet CICI, qui a réalisé les échantillons et donné ses conseils d'expert dans le domaine de la fabrication additive; Christophe CLAUDIN, Maryane JACQUIER et Florian DUMONT qui m'ont assistée pour préparer et caractériser mes échantillons. Je remercie également Elodie CABROL pour son aide dans la caractérisation des poudres et l'analyse de la porosité.

Je tiens également à remercier Isabelle PLETTO qui accompagne tous les doctorants par son soutien et qui m'a aidé avec la préparation de ma thèse. Laurence BERTRAND, pour m'avoir simplifié la vie autour de nos activités au sein du laboratoire, surtout au début de ma mission.

Enfin, un grand merci à ma famille, mes parents et mon mari qui me soutiennent et m'encouragent depuis toujours. Merci à ma meilleure amie Irina SHUSTOVA pour tous les bons moments que nous partageons ensemble depuis plusieurs années, mais aussi pour son soutien dans les moins bons.





# Résumé

---

Dans le cadre de ce travail, la génération des surfaces produites par le procédé de fusion laser sur lit de poudre LPBF a été étudiée. Le LPBF est un procédé de fabrication additive qui peut conduire à de nouvelles opportunités (fabrication de structures complexes avec canaux internes, structures lattices). Ce procédé attire donc une attention considérable en particulier dans l'industrie aéronautique.

Une étude de l'influence des paramètres primaires du procédé LPBF sur la génération des surfaces a été réalisée. Au cours de cette étude, la relation entre la rugosité des surfaces supérieures et latérales et la densité du matériau a été établie. Cela a permis de déterminer la première fenêtre de paramètres optimaux.

Une analyse de la dispersion de la rugosité et la reproductibilité du procédé ont ensuite été réalisées. Cette analyse a révélé une importante dispersion de la rugosité, notamment d'une face à l'autre. En conséquence, des recommandations sur les mesures de surface ont été proposées.

L'effet de différents paramètres secondaires est également étudié afin de mieux comprendre la génération de la surface latérale et de l'optimiser. Cette étude a montré que les compensations et les réglages de contour sont des paramètres clés qui peuvent contribuer à la réduction de la rugosité des surfaces latérales.

Sur la base des résultats de ces études, la rugosité a pu être diminuée d'un  $Sa$  de 40  $\mu\text{m}$  à un  $Sa$  de 10  $\mu\text{m}$ .

Enfin, cette thèse présente une nouvelle approche de modélisation de génération des topographies des surfaces latérales. L'approche est basée sur la géométrie du cordon (rayons de courbure). Elle permet de prendre en compte la position des cordons et des couches et prédit la rugosité pour différentes stratégies de lasage et paramètres de compensation.

**Mots clés:** *Fusion laser sur lit de poudre, Alliage d'aluminium, Topographie de surface, Paramètres de procédé, Optimisation de la rugosité, Modèle numérique.*



# Abstract

---

In the current study, surface generation during additive manufacturing (AM), especially the laser powder bed fusion (LPBF) process was studied. LPBF is a progressive process that can lead to new opportunities, such as applications that require complex structures (internal channels or lightweight lattice structures). It has therefore attracted considerable attention, which has led to research and development in many industries, particularly in the aerospace industry.

A surface generation study to optimize surface roughness and material density by examining the influence of the primary LPBF process parameters was therefore performed. During this study, the relationship between the roughness of the top and side surfaces and the density of the material was established. This made it possible to determine the first window of optimal parameters.

An analysis of the roughness dispersion and process reproducibility were then carried out. This analysis revealed a significant roughness dispersion, especially from one side to the other. As a result, recommendations on surface measurements have been proposed.

The effect of different process options (secondary parameters) are also studied in order to better understand the generation of the side surface and optimize it. This study showed that compensations and contour settings are key parameters that can help reduce the side surface roughness. Indeed, the geometric positioning of the different weld tracks is an important issue that must be addressed to reduce surface roughness. Based on the results of this study, it is possible to reduce the average surface roughness  $S_a$  from 40 to 10  $\mu\text{m}$ .

Finally, this thesis presents a new approach to modeling side surfaces roughness (at  $0^\circ$ ). The approach is based on the weld track geometry (radii of curvature). It allows to take into account the weld tracks and layers position in relation to each other and thus to predict the roughness for different scanning strategies, compensation parameters.

**Key words:** *Laser powder bed fusion, Aluminum Alloy, Surface Topography, Process Parameters, Roughness optimization, Numerical Model.*



# Table des matières

---

<b>Résumé</b> .....	5
<b>Abstract</b> .....	7
<b>Table des figures</b> .....	13
<b>Liste des tableaux</b> .....	21
<b>Nomenclature</b> .....	23
<b>Introduction générale</b> .....	25
<b>Chapitre 1 : Introduction</b> .....	27
1.1. Contexte aéronautique .....	28
1.1.1. Les besoins et contraintes dans l'industrie aéronautique .....	28
1.1.2. Les réponses aux besoins .....	31
1.1.3. La fabrication additive : une nouvelle réponse aux besoins aéronautiques .....	32
1.2. La fabrication additive .....	33
1.2.1. Généralités sur les procédés de fabrication additive .....	33
1.2.2. Procédés PBF et DED pour la réalisation de pièces métalliques .....	34
1.2.3. LPBF pour la réalisation de pièces métalliques de précision .....	36
1.2.4. Les défis du procédé LPBF .....	37
1.3. Généralités sur la caractérisation des topographies de surface .....	38
1.3.1. Définitions .....	38
1.3.2. Acquisition des topographies .....	40
1.3.3. Prétraitement des topographies .....	44
1.3.4. Caractérisation des topographies .....	45
1.4. Topographies de surface en Fabrication Additive .....	46
1.4.1. Génération de surfaces en FA .....	46
1.4.2. Facteurs affectant potentiellement l'état de surface en LPBF .....	48
1.4.3. Analyse des topographies de surface issues de Fabrication Additive .....	61
1.5. Modélisation de topographies générées en Fabrication Additive .....	63
1.6. Objectifs de la thèse .....	73
<b>Chapitre 2 : Méthodes expérimentales</b> .....	75
2.1. Production des échantillons .....	76
2.1.1. Caractérisation et préparation de la poudre .....	76

## Table des matières

---

2.1.2. Elaboration des échantillons.....	78
2.2. Paramètres secondaires du procédé.....	82
2.3. Approche expérimentale.....	85
2.4. Caractérisation des échantillons .....	86
2.4.1. Moyens d'analyse des porosités .....	87
2.4.2. Moyens d'analyse de la topographie des surfaces .....	89
<b>Chapitre 3 : Influence des paramètres primaires sur la rugosité latérale et la densité des pièces.....</b>	<b>93</b>
3.1. Première campagne de tests à faible puissance .....	94
3.1.1. Tentative de création de cordons stables.....	95
3.1.2. Tentative de création de pièces volumiques .....	97
3.1.3. Conclusion .....	101
3.2. Deuxième campagne de tests à puissance élevée .....	102
3.2.1. Recherche de la fenêtre de paramètres pour l'optimisation du procédé LPBF à l'échelle du cordon .....	102
3.2.2. Recherche de la fenêtre de paramètres pour l'optimisation du procédé LPBF à l'échelle du cube.....	104
3.2.3. Conclusion .....	110
<b>Chapitre 4 : Analyse de la dispersion de la rugosité de surface latérale.....</b>	<b>113</b>
4.1. Reproductibilité de la rugosité sur différents plateaux .....	114
4.2. Reproductibilité de la rugosité pour différents emplacements d'échantillons sur une même plateau .....	116
4.3. Dispersion de la rugosité sur différentes faces d'un échantillon.....	117
4.4. Dispersion de la rugosité pour différents emplacements sur une face d'un échantillon.....	120
4.5. Conclusion .....	121
<b>Chapitre 5 : Influence des paramètres secondaires sur la rugosité latérale.....</b>	<b>123</b>
5.1. Variable unique .....	124
5.1.1. Stratégies de lasage (sans contour) .....	124
5.1.2. Post-scanning .....	126
5.1.3. Compensations .....	128
5.1.4. Contour .....	134
5.2. Effet combiné de plusieurs variables .....	136
5.2.1. Compensations combinées avec une stratégie contour .....	136
5.2.2. Surfaces inclinées avec et sans contour.....	138

---

5.3. Conclusions .....	139
<b>Chapitre 6 : Modélisation de la génération des surfaces latérales</b> .....	141
6.1. Etude préliminaire .....	142
6.1.1. Collecte des données expérimentales.....	142
6.2. Démarche générale de modélisation.....	146
6.2.1. Modélisation de mono cordons .....	146
6.2.2. Combinaison de plusieurs cordons .....	147
6.3. Validation du modèle avec les résultats expérimentaux.....	151
6.4. Étude de sensibilité du modèle .....	158
6.5. Conclusions .....	161
<b>Conclusion générale</b> .....	163
<b>Bibliographie</b> .....	167





# Table des figures

---

Figure 1.1 – Les matériaux structurels utilisés dans un avion moderne (Airbus A350 XWB) adapté de [4,6].....	29
Figure 1.2 – Vue éclatée d’un turboréacteur (adapté de [4]) .....	29
Figure 1.3 – Aube de turbine avec un profil aérodynamique et des canaux de refroidissement (adapté de [2,4]).....	30
Figure 1.4 – Schéma indiquant l'intersection de la sélection des matériaux, des géométries des composants et la fabricabilité qui détermine la zone de solution optimale (adapté de [3]).....	32
Figure 1.5 – Schéma de classification des principales technologies de FA selon l'état des matières premières, le forme d'alimentation, le principe de fabrication et la pertinence de matériaux utilisables adapté de [8] (VP – vat photopolymerization; BJ – binder jetting; MJ – material jetting; PBF – powder bed fusion; DED – directed energy deposition; ME – material extrusion and SL – sheet lamination).....	34
Figure 1.6 – Classification des principales technologies de la FA métallique adapté de [13].....	35
Figure 1.7 – Représentation du procédé de fusion sur lit de poudre par laser (LPBF) ..	36
Figure 1.8 – Déroulement du procédé de LPBF.....	37
Figure 1.9 – Un échantillon réalisé par LPBF et deux surfaces distinctes: surface supérieure et surface latérale.....	37
Figure 1.10 – Exemple de pièces fabriquées par le procédé LPBF avec des surfaces difficiles d'accès pour le post-traitement .....	38
Figure 1.11 – Les différentes composantes d’une topographie de surface produite par le procédé LPBF .....	39
Figure 1.12 – Trois grandes étapes dans l'analyse de la topographie de surface .....	40
Figure 1.13 – Représentation des mesures de profil 2D et de surface 3D.....	40
Figure 1.14 – Différents moyens d’acquisition de topographies de surface.....	41
Figure 1.15 – Résolution de moyens d’acquisition [25,30] .....	42
Figure 1.16 – Représentation schématique du prétraitement a) des profils et b) des surfaces extraites en utilisant différentes techniques de filtration .....	45
Figure 1.17 – Les différents types de surface en LPBF adapté de [23].....	47
Figure 1.18 – injecteur de fusée et surfaces accessibles et difficilement voire non accessibles pour le post-traitement (adapté de [21]) .....	47
Figure 1.19 – Relation entre procédé, phénomènes physiques et fonctionnalité de la pièce.....	48

## Table des figures

---

Figure 1.20 – Effet balling: a) différents cordons avec et sans effet balling; b) différentes surfaces (ou $\alpha$ – angle d’inclinaison de surface) avec l’indication de l’effet balling adapté de [51,69] .....	49
Figure 1.21 – Schéma de l’effet rippling [71] .....	49
Figure 1.22 – Effet rippling sur la surface supérieure adapté de [14] .....	50
Figure 1.23 – Surface de fabrication additive avec des particules de poudre attachées .....	50
Figure 1.24 – Phénomène de dénudation.....	51
Figure 1.25 – Image MEB d’une surface avec une inclinaison de $10^\circ$ [14] .....	51
Figure 1.26 – Schéma de l’effet d’escalier pour une sphère [35,77] .....	52
Figure 1.27 – Image MEB des poudres métalliques élaborées par: a) atomisation au gaz; b) atomisation à l’eau [51] .....	53
Figure 1.28 – Exemples de distribution de taille de poudre: a) Gaussienne; b) taille cumulative [51].....	53
Figure 1.29 – Paramètres de base ou primaires du procédé LPBF .....	56
Figure 1.30 – Schéma de la zone de recouvrement entre deux cordons adjacents et la relation géométrique établie entre la rugosité R verticale de la surface et l’écart vecteur H [43] .....	57
Figure 1.31 – Schéma illustrant la réduction de l’effet escalier lorsque l’angle d’inclinaison est augmenté de $30^\circ$ à $60^\circ$ [66]. .....	58
Figure 1.32 – Effet escalier et supports: influence de la configuration de construction sur la rugosité de surface [71].....	59
Figure 1.33 – Mesure de profil extraite d’une mesure surfacique. D’après la trace du profil, "A" pourrait être un cratère ou une rayure. D’après la mesure surfacique, le même emplacement "B" indique clairement une rayure [27].....	63
Figure 1.34 – Représentation schématique d’un profil d’escalier [79] .....	64
Figure 1.35 – Modèle de paramètres d’évaluation de la rugosité de surface pour le procédé FDM [92].....	65
Figure 1.36 – Définition des surfaces en dépouille et contre dépouille en fonction du concept d’orientation de fabrication [94] .....	66
Figure 1.37 – Effet de filetage lors du frittage des couches (surfaces orientées vers le bas) : a) faible puissance laser; b) haute pénétration à puissance laser élevée [94] .....	67
Figure 1.38 – Représentation schématique de la vue latérale et de la vue supérieure avec la fraction de particules $\lambda$ et la section transversale de la surface modélisée [79].....	68
Figure 1.39 – Représentation schématique d’un profil d’escalier avec des particules attachées pour différents angles d’inclinaison $\alpha$ [35] .....	69

Figure 1.40 – Formation périodique des ménisques sur la surface latérale des cordons [80] .....	70
Figure 1.41 – Formulation analytique des contours de la zone fondue [80] .....	70
Figure 1.42 – Schéma pour le calcul de la hauteur du ménisque $W$ : a) principe du modèle : coupe transverse avec translation de la zone fondue de $\Delta h$ selon $y$ ; b) zoom sur la partie latérale avec point d'intersection $(x_c, y_c)$ [80] .....	71
Figure 1.43 – Schématisation de l'effet de $b_1$ et $\Delta h$ sur la hauteur du ménisque: a) rapport $b_1/\Delta h$ moyen b) rapport $b_1/\Delta h$ élevé [95] .....	71
Figure 2.1 – Images MEB de la poudre AlSi10Mg utilisée pour cette étude: a) grossissement 1000 $\times$ ; b) grossissement 4000 $\times$ .....	77
Figure 2.2 – Distribution granulométrique de la poudre AlSi10Mg utilisée pour la thèse .....	78
Figure 2.3 – Machine de fusion laser ProX DMP 200 .....	78
Figure 2.4 – Vue de dessus du plateau de construction montrant la distribution de poudre, les directions de gaz et la disposition des échantillons .....	79
Figure 2.5 – Gauche: échantillon d'essai avec les surfaces Face 1 et Haut sélectionnées pour mesurer les valeurs de rugosité de surface; Droite: stratégie de balayage avec des cordons aller-retour tournés de 90° d'une couche à l'autre .....	80
Figure 2.6 – Deux types d'orientation des échantillons sur le plateau par rapport à la direction de la distribution de poudre: a) angle de 45° – contact primaire minimal entre le rouleau et l'échantillon; b) angle de 90° – contact primaire maximal entre le rouleau et l'échantillon .....	81
Figure 2.7 – Fabrication des échantillons .....	82
Figure 2.8 – Relation entre la stratégie de fusion et la topographie de surface supérieure: a) stratégie linéaire; b) stratégie en îlots (damier) [82] .....	83
Figure 2.9 – Principe de la mesure de la porosité par pesées successives d'un échantillon dans l'air puis dans l'eau, basé sur la méthode d'Archimède .....	87
Figure 2.10 – Principe de la mesure de la porosité des échantillons par analyse d'image .....	88
Figure 2.11 – Comparaison des valeurs de porosité obtenues par la méthode d'Archimède et par analyse d'images en fonction de la densité d'énergie volumique (VED) .....	89
Figure 2.12 – Schéma du principe de fonctionnement d'un microscope à variation focale .....	90
Figure 2.13 – Vue du dispositif de mesure de topographies de surface .....	91
Figure 2.14 – Gauche: une représentation schématique du principe de l'interaction électron-matériau; Droit: le microscope TESCAN Vega II SBH et les images produites. 92	92

## Table des figures

---

Figure 2.15 – Étapes de l'analyse de la topographie de surface dans le cadre de cette thèse.....	92
Figure 3.1 – Différentes fenêtres de paramètres de procédé utilisées dans la littérature pour lesquelles des cordons stables et des pièces denses sont obtenues .....	95
Figure 3.2 – Vue de dessus des cordons monocouches avec différentes valeurs de LED .....	96
Figure 3.3 – Cubes construits avec une puissance de 100 W .....	97
Figure 3.4 – Différentes fenêtres de paramètres de procédé utilisées dans la littérature et récapitulatif des fenêtres testées .....	101
Figure 3.5 – Coupes transversales et vue de dessus de cordons avec différentes valeurs de LED.....	102
Figure 3.6 – Comparaison des fenêtres optimales de paramètres LED pour une poudre d'aluminium de granulométrie 15-45 $\mu\text{m}$ (littérature) avec une poudre d'aluminium de granulométrie 5-25 $\mu\text{m}$ (résultats expérimentaux de l'étude) .....	103
Figure 3.7 – Plateau d'échantillons produits avec des paramètres de LED sélectionnés et des écarts vecteur variables.....	105
Figure 3.8 – Rugosité des surfaces et densité des pièces en fonction de la densité d'énergie volumique (VED) selon l'analyse de 2018.....	106
Figure 3.9 – Rugosité des surfaces supérieures en fonction de la densité d'énergie volumique (VED) selon l'analyse de 2020 .....	108
Figure 3.10 – Densité des pièces en fonction de la densité d'énergie volumique (VED) selon l'analyse de 2020 .....	108
Figure 3.11 – Rugosité des surfaces latérales en fonction de la densité d'énergie volumique (VED) selon l'analyse de 2020 .....	109
Figure 3.12 – Comparaison générale de l'analyse 2018 et de l'analyse complémentaire 2020 avec des images d'échantillons MEB.....	110
Figure 4.1 – Résumé graphique des dispersions et reproductibilités de la rugosité étudiée .....	114
Figure 4.2 – Disposition des cinq échantillons de reproductibilité sur les plateaux....	115
Figure 4.3 – Reproductibilité de la rugosité sur différents plateaux selon les valeurs moyenne.....	115
Figure 4.4 – Reproductibilité de la rugosité sur différents plateaux selon l'emplacement sur le plateau.....	116
Figure 4.5 – Ordre de disposition des vingt-cinq échantillons sur un plateau .....	116
Figure 4.6 – Cartographie des valeurs de rugosité des échantillons pour différents emplacements sur le plateau de construction.....	117
Figure 4.7 – Dispersion de la rugosité sur les différentes faces d'un cube produit.....	118

Figure 4.8 – Images MEB des faces 1 et 4.....	118
Figure 4.9 – Représentation schématique de la formation des faces en croisant des couches paires et impaires: a) couche de balayage paire ; b) couche de balayage impaire ; c) couches de balayage paires et impaires .....	119
Figure 4.10 – Dispersion de la rugosité sur les quatre faces du cube .....	120
Figure 5.1 – Schéma des stratégies de fusion laser : a) croisée à 90° (stratégie de base); b) croisée à 67°; c) en carrés (remplissage en damier); d) en hexagones.....	124
Figure 5.2 – Influence des stratégies de lasage sur la rugosité de la surface supérieure .....	125
Figure 5.3 – Influence des stratégies de lasage sur la rugosité de la surface latérale .	126
Figure 5.4 – Le schéma de chevauchement des cordons de fusion multiples avec l'écart vecteur de base (à gauche) et l'écart vecteur de post-scan (à droite).....	126
Figure 5.5 – Effet du post-scanning sur la rugosité de surface supérieure .....	127
Figure 5.6 – Effet de post-scanning sur la rugosité de surface latérale .....	128
Figure 5.7 – Représentation schématique du trajet de la tête laser avec description des paramètres de compensation.....	129
Figure 5.8 – Position de la valeur de compensation égale à zéro par rapport à la limite théorique de la pièce: a) offset = 0; b) offset = -40 $\mu\text{m}$ .....	129
Figure 5.9 – Représentation schématique de la position de compensation par rapport au bord de la pièce (zone zéro): a) avec un offset = 0; b) avec un offset = -40 $\mu\text{m}$ .....	130
Figure 5.10 – Représentation schématique du changement de delta en fonction de la position de Fin par rapport au Début .....	130
Figure 5.11 – Diminution de la rugosité de la surface latérale en fonction du paramètre de compensation $\Delta$ .....	131
Figure 5.12 – Forme du bain de fusion solidifiée à la fin et au début du cordon [14] et sans poudre.....	132
Figure 5.13 – Fin des cordons disparaissant à l'intérieur du cube au profit des cordons de la couche n + 1, parallèles à la surface générée. ....	133
Figure 5.14 – Deux cas de réglages de contour : "Lasage puis contour" et "Contour puis lasage" .....	134
Figure 5.15 – L'effet du contour sur la rugosité de la surface latérale.....	135
Figure 5.16 – Réglage du contour « Contour puis lasage » .....	136
Figure 5.17 – Réglage du contour « Lasage puis contour » .....	136
Figure 5.18 – Face 1 et Face 4 de l'échantillon avec compensation et contour optimisés .....	137
Figure 5.19 – La rugosité de surface latérale en fonction de la densité d'énergie linéaire (LED) du contour .....	138

## Table des figures

---

Figure 5.20 – Échantillons inclinés avec et sans réglage de contour .....	138
Figure 5.21 – Dépendance de la rugosité de la surface latérale sur l'angle d'inclinaison avec et sans réglage du contour .....	139
Figure 6.1 – Echantillon produit avec une stratégie « Aller simple » et représentation des surfaces avec le début (Face 1), la fin (Face 3) et les côtés (Faces 2 et 4) des cordons	143
Figure 6.2 – Images MEB montrant la différence de topographie entre les Face 1, Face 2 et Face 3 .....	143
Figure 6.3 – Détermination de la valeur moyenne à partir de cinq mesures de rayon	144
Figure 6.4 – Mesure du début et de la fin des cordons dans le plan YX .....	144
Figure 6.5 – Mesure du début et de la fin des cordons dans le plan ZY .....	145
Figure 6.6 – Mesure du côté des cordons dans le plan XZ.....	145
Figure 6.7 – Modélisation d'un mono cordon à l'aide d'une fonction ellipsoïde basée sur les valeurs de rayon de courbure expérimentales: a) début de cordon; b) fin de cordon; c) côté de cordon.....	147
Figure 6.8 – Détermination de la dimension de la surface modélisée et de l'origine ..	148
Figure 6.9 – Face 1 de la stratégie « Aller-retour croisée » .....	148
Figure 6.10 – Définition du $\Delta Z1$ comme la distance entre le début et la fin des vecteurs de balayage .....	149
Figure 6.11 – Définition du $\Delta Z2$ comme la différence entre la position de couche n-1 et couche n .....	149
Figure 6.12 – Combinaison de cordons le long de l'axe $x$ pour Face 1 de la stratégie « Aller-retour croisée » .....	150
Figure 6.13 – Combinaison de cordons le long de l'axe $y$ pour Face 1 de la stratégie « Aller-retour croisée» .....	151
Figure 6.14 – Échantillon avec la stratégie « Aller simple » avec différentes faces pour la modélisation.....	152
Figure 6.15 – Définition des écarts $\Delta Z1$ et $\Delta Z2$ pour les Faces 1 et 3 .....	152
Figure 6.16 – Définition des écarts $\Delta Z1$ et $\Delta Z2$ pour les Faces 2 et 4 .....	153
Figure 6.17 – Comparaison des valeurs de rugosité expérimentales avec les valeurs modélisées pour la stratégie « Aller simple » .....	153
Figure 6.18 – Topographies de surfaces réelles et simulées .....	154
Figure 6.19 – Échantillon avec la stratégie « Aller-retour croisée » pour la modélisation de la dispersion de la rugosité sur différentes faces .....	155
Figure 6.20 – Définition des écarts $\Delta Z1$ et $\Delta Z2$ : a) pour les faces 1 et 2; b) pour les faces 3 et 4.....	155

---

Figure 6.21 – Comparaison des valeurs de rugosité réelles et simulées pour l'analyse de dispersion des différentes faces d'un cube produit .....	156
Figure 6.22 – Face 1 de la stratégie « Aller-retour croisée » choisie pour l'analyse de la compensation .....	156
Figure 6.23 – Définition des écarts $\Delta Z1$ et $\Delta Z2$ pour l'analyse de la compensation...	157
Figure 6.24 – Comparaison des valeurs expérimentales et simulées de la rugosité de la face 1 en fonction de $\Delta Z1$ .....	157
Figure 6.25 – Face 1 avec des écarts $\Delta Z1$ et $\Delta Z2$ sélectionnée pour l'étude de sensibilité du modèle .....	158
Figure 6.26 – Influence de la taille du rayon du début sur la variation de la rugosité de surface.....	159
Figure 6.27 – Influence de la taille du rayon de la fin de cordon sur la rugosité de surface .....	159
Figure 6.28 – Influence de la taille d'écart vecteur sur la rugosité de surface .....	160
Figure 6.29 – Influence de la taille de l'épaisseur de la couche sur la rugosité de surface .....	160





# Liste des tableaux

---

Tableau 1.1 – Matériaux utilisés dans les avions Boeing (% du poids) adapté de [4] ....	31
Tableau 1.2 – Les sept principales technologies de fabrication additive selon la norme ISO 52900:2015 (adapté de [8]).....	33
Tableau 1.3 – Comparaison de certaines techniques d'additives métalliques sur la base de plusieurs références [12-14].....	35
Tableau 1.4 – Avantages et inconvénients des moyens de mesure à contact et sans contact adapté de [31].....	43
Tableau 1.5 – Les paramètres de surface et profil principaux selon la norme ISO 4287:1997 et ISO 25178-2:2012 .....	46
Tableau 1.6 – Revue des facteurs du procédé LPBF, leur influence sur des phénomènes physiques engendrés et les conséquences potentielles sur la fonctionnalité des pièces .....	60
Tableau 1.7– Résumé des modèles existants dans la littérature prédisant la rugosité de surface.....	72
Tableau 2.1– AlSi10Mg composition chimique en poids % (TLS Technik).....	77
Tableau 2.2 – Principales caractéristiques techniques de la machine ProX DMP 200 LPBF .....	79
Tableau 2.3 – Liste des paramètres fixes.....	80
Tableau 2.4 – Les valeurs de porosité pour six échantillons obtenues par la méthode d'Archimède et par l'analyse d'images .....	89
Tableau 2.5 – Les paramètres d'acquisition de la topographie de surface par le microscope à variation de focus .....	90
Tableau 3.1 – Paramètres du procédé sélectionnés pour la formation des cordons monocouche à une puissance fixe de 100 W .....	96
Tableau 3.2 – Paramètres du procédé sélectionnés pour la construction de cubes à une puissance fixe de 100 W .....	97
Tableau 3.3 – Topographie des surfaces supérieures des cubes construits à une puissance constante de 100 W .....	98
Tableau 3.4 – Topographie des surfaces latérales des cubes construits à une puissance constante de 100 W .....	99
Tableau 3.5 – Images au microscope optique des porosités des cubes construits à une puissance constante de 100 W .....	100
Tableau 3.6 – Paramètres du procédé primaires sélectionnés pour l'optimisation LED .....	102

## Liste des tableaux

---

Tableau 3.7 – Paramètres de procédé pour l'optimisation VED.....	104
Tableau 3.8 – Valeurs VED sélectionnées pour vérifier la reproductibilité des courbes de rugosité et de densité obtenues en 2018 .....	107
Tableau 5.1 – Paramètres de post-scanning.....	127
Tableau 5.2 – Paramètres Delta .....	131
Tableau 5.3 – Paramétrés de contour variable .....	137

# Nomenclature

---

## Abréviation

<i>AFM</i>	Atomic force microscope – Microscope à force atomique
<i>BJ</i>	Binder Jetting – Jet de liant
<i>CAO</i>	Computer aided design – Conception assistée par ordinateur
<i>CCD</i>	Charge Coupled Device – Dispositif à transfert de charges
<i>DED</i>	Direct Energy Deposition - Dépôt de matière sous énergie concentrée
<i>EBM</i>	Electron Beam Melting – Fusion sur lit de poudre par faisceau d'électrons
<i>FA</i>	Fabrication additive
<i>FAO</i>	Fabrication assistées par ordinateur
<i>FDM</i>	Fused Deposition Modeling – Dépôt de fil fondu
<i>LPBF</i>	Laser powder bed fusion – Fusion laser sur lit de poudre
<i>ME</i>	Material Extrusion - Extrusion de matériaux
<i>MEB</i>	Microscope électronique à balayage
<i>MJ</i>	Material Jetting – Jetting
<i>PBF</i>	Powder bed fusion – Fusion sur lit de poudre
<i>SL</i>	Sheet Lamination – Laminage de feuilles
<i>SLM</i>	Selective laser melting – Fusion sélective par laser
<i>SLA</i>	Stéréolithographie
<i>VP</i>	Vat Photopolymerisation – Photopolymérisation en cuve

## Paramètres du procédé

<i>d</i>	Épaisseur de couche [ $\mu\text{m}$ ]
<i>h</i>	Écart vecteur [ $\mu\text{m}$ ]
<i>LED (<math>E_L</math>)</i>	Linear energy density – Densité d'énergie linéique [ $\text{J}/\text{mm}$ ]
<i>P</i>	Puissance laser [ $\text{W}$ ]
<i>V</i>	Vitesse de fusion [ $\text{mm}/\text{s}$ ]
<i>VED (<math>E_V</math>)</i>	Volumetric energy density – Densité d'énergie volumique [ $\text{J}/\text{mm}^3$ ]
$\varnothing$	Diamètre du faisceau laser [ $\mu\text{m}$ ]

## Paramètres de configuration des pièces

$\alpha$	Angle d'inclination [ $^\circ$ ]
$\theta$	Orientation de fabrication [ $^\circ$ ]

### Paramètre statistique

$\sigma$  Écart-type [ $\mu\text{m}$ ]

### Paramètres de densité

$m_{\text{air}}$  Masse de l'échantillon pesée dans l'air [g]

$m_{\text{immergée}}$  Masse de l'échantillon pesée dans l'eau [g]

$\rho_{\text{absolue}}$  Masse volumique absolue [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

$\rho_{\text{eau}}$  Masse volumique de l'eau distillée [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

$\rho_{\text{relative}}$  Densité de l'échantillon [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

$\rho_{\text{théorique}}$  Masse volumique théorique [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

### Paramètres de rugosité

$Ra$  Écart moyenne arithmétique du profil

$Rq$  Écart moyenne quadratique du profil

$Rp$  Hauteur maximale des pics du profil

$Rv$  Hauteur maximale de creux du profil

$Rz$  Hauteur maximale du profil

$Rsk$  Facteur d'asymétrie du profil

$Rku$  Facteur d'aplatissement du profil

$R\Delta q$  Pente moyenne du profil

$Rk, Rpk, Rvk$  Paramètres associés à la courbe du taux de longueur portante

$Sa$  Écart moyenne arithmétique de la surface

$Sq$  Écart moyenne quadratique de la surface

$Sp$  Hauteur maximale des pics de la surface

$Sv$  Hauteur maximale de creux de la surface

$Sz$  Amplitude maximale de la surface

$Ssk$  Facteur d'asymétrie de la surface

$Sku$  Facteur d'aplatissement de la surface

$Sal$  Longueur d'autocorrélation

$Str$  Ratio d'aspect de texture

$Std$  Direction de la texture

$Sdr$  Courbure moyenne quadratique de la surface

$Sdq$  Ratio de la surface développée

$Sk, Spk, Svk$  Paramètres linéaires de surface portante

# Introduction générale

---

L'industrie aéronautique innove constamment pour s'adapter aux défis techniques (ajout de fonctionnalités nouvelles), économiques et environnementaux (allègement des structures) de demain. Dans ce contexte, les industriels doivent constamment répondre aux besoins (matériaux légers et résistants, géométrie complexe, etc.) tout en respectant certaines contraintes.

La fabrication additive (FA) répond à certains des défis majeurs auxquels est confrontée l'industrie aéronautique. Elle offre une approche nouvelle à la conception et à la production. De ce fait la FA permet de produire des pièces fonctionnelles à la géométrie complexe, de manière rentable et sur un délai court. En outre, la fabrication additive se prête bien aux matériaux à haute performance et peut entraîner une réduction significative du poids des composants.

Parmi ces procédés la fusion laser sur lit de poudre (LPBF) offre la possibilité de générer des formes plus fines et complexes. Malgré cela, à ce jour, la rugosité des surfaces générées par LPBF reste élevée par rapport aux procédés de fabrication conventionnels. Par conséquent, les surfaces brutes issues du procédé LPBF sont importantes à étudier et à améliorer. Une meilleure compréhension de ce procédé et de la génération des surfaces est donc nécessaire.

Dans ce contexte, cette thèse se consacre à: (i) la compréhension de la génération des surfaces en vue d'optimiser les paramètres primaires (puissance laser, vitesse de fusion, etc.); (ii) l'analyse de la dispersion de la rugosité des surfaces latérales due au procédé LPBF; (iii) la compréhension de la génération des surfaces en vue d'optimiser les paramètres secondaires (stratégie de fusion, post-scanning, etc.), (iiii) développement d'un modèle numérique pour les surfaces latérales basé sur la géométrie des cordons.

Pour présenter les travaux de thèse, le mémoire est organisé en six chapitres :

- Le Chapitre 1 présente une revue de la littérature qui examine plus en détail l'intérêt de ce travail. Il couvre également des informations générales sur les procédés de fabrication additive et se concentre sur la topographie des surfaces produites par fusion laser sur lit de poudre (LPBF). Le chapitre se termine par une discussion sur les méthodes de modélisation des surfaces FA.
- Le Chapitre 2 présente les méthodes expérimentales mises en œuvre au cours de la thèse: matériaux, élaboration des échantillons, paramètres et moyens de caractérisation. L'approche expérimentale et les protocoles d'analyse de différentes propriétés (densité et rugosité) sont également présentés.
- Le Chapitre 3 est axé sur la compréhension de l'influence des paramètres primaires du procédé LPBF afin de trouver une fenêtre paramétrique optimale pour l'alliage AlSi10Mg en termes de rugosité de la surface latérale et de densité du matériau.

- Le Chapitre 4 se focalise sur l'analyse de la dispersion de la rugosité de surface latérale. Pour les paramètres primaires optimaux obtenus, la reproductibilité du procédé en termes de rugosité de surface est évaluée pour différents plateaux, pour différentes positions sur un même plateau. La dispersion de la rugosité est également examinée sur différentes faces d'un échantillon et pour différentes zones d'une même face.
- Le Chapitre 5 étudie l'effet des paramètres secondaires du procédé sur la qualité des surfaces afin de mieux comprendre la génération de la surface latérale et de l'optimiser. Les paramètres définis comme optimaux lors de l'optimisation primaire sont pris comme base.
- Le Chapitre 6 présente une nouvelle approche de modélisation des surfaces latérales. L'essence de cette approche consiste à créer un modèle numérique dont les paramètres d'entrée sont les valeurs moyennes des rayons de courbure des cordons.

---

# Chapitre 1 : Introduction

---

## Sommaire

---

<b>1.1. Contexte aéronautique</b> .....	28
1.1.1. Les besoins et contraintes dans l'industrie aéronautique .....	28
1.1.2. Les réponses aux besoins .....	31
1.1.3. La fabrication additive : une nouvelle réponse aux besoins aéronautiques .....	32
<b>1.2. La fabrication additive</b> .....	33
1.2.1. Généralités sur les procédés de fabrication additive .....	33
1.2.2. Procédés PBF et DED pour la réalisation de pièces métalliques .....	34
1.2.3. LPBF pour la réalisation de pièces métalliques de précision .....	36
1.2.4. Les défis du procédé LPBF .....	37
<b>1.3. Généralités sur la caractérisation des topographies de surface</b> .....	38
1.3.1. Définitions .....	38
1.3.2. Acquisition des topographies .....	40
1.3.3. Prétraitement des topographies .....	44
1.3.4. Caractérisation des topographies .....	45
<b>1.4. Topographies de surface en Fabrication Additive</b> .....	46
1.4.1. Génération de surfaces en FA .....	46
1.4.2. Facteurs affectant potentiellement l'état de surface en LPBF .....	48
1.4.2.1. Propriétés de la poudre LPBF .....	52
1.4.2.2. Paramètres du procédé LPBF .....	56
1.4.2.3. Configuration de la pièce à produire LPBF .....	58
1.4.2.4. Conclusion LPBF .....	59
1.4.3. Analyse des topographies de surface issues de Fabrication Additive .....	61
1.4.3.1. Acquisition des surfaces issues de Fabrication Additive .....	61
1.4.3.2. Traitement des topographies de surfaces issues de Fabrication Additive .....	62
<b>1.5. Modélisation de topographies générées en Fabrication Additive</b> .....	63
<b>1.6. Objectifs de la thèse</b> .....	73

---



La première partie de ce chapitre traite de l'intérêt pour les alliages d'aluminium et la fabrication additive dans le contexte aéronautique (section 1.1). Dans ce contexte, il devient clair que les alliages d'aluminium ne perdent pas de leur popularité, alors que, la fabrication additive est considérée comme la nouvelle réponse aux besoins aéronautiques. La deuxième partie du chapitre est consacrée aux informations générales sur les procédés de fabrication additive et notamment la fusion laser sur lit de poudre (section 1.2). Une revue de la littérature montre que le procédé LPBF permettant de générer des formes plus fines et complexes que les autres procédés génèrent tout de même des surfaces brutes de mauvaise qualité par rapport aux procédés de fabrication conventionnels. Cela limite la mise en œuvre industrielle pour des pièces à fortes exigences, surtout celles qui ne peuvent être post-traitées (présence de canaux internes par exemple). De ce fait, les surfaces brutes issues du procédé LPBF sont importantes à étudier et à améliorer. Les troisièmes et quatrièmes parties du chapitre abordent des généralités sur les caractérisations des topographies de surface (section 1.3) et les phénomènes physiques responsables de la formation de la topographie de surface en procédé LPBF (section 1.4). Les différents moyens d'acquisition ainsi que les étapes de la caractérisation de la topographie de surface sont présentés. L'accent est mis sur l'étude de la formation de la surface latérale et son optimisation. Le chapitre se termine par un état de l'art des modèles existants prédisant la rugosité des surfaces FA (section 1.5). Enfin, l'objectif du travail est défini et l'approche du travail de thèse est présentée (section 1.6).

### **1.1. Contexte aéronautique**

L'industrie aéronautique innove constamment pour s'adapter aux défis techniques (l'ajout de nouvelles fonctionnalités), économiques (la réduction des coûts) et environnementaux (l'allègement de structures) de demain [1]. Ainsi, dans ce contexte, les départements de Recherche et Développement doivent répondre aux besoins [2] tout en respectant certaines contraintes (sous-sections 1.1.1 et 1.1.2). Dans cette section, l'intérêt de la fabrication additive pour répondre aux exigences aéronautiques sera également présenté (sous-section 1.1.3)

#### **1.1.1. Les besoins et contraintes dans l'industrie aéronautique**

##### **Un besoin en matériaux légers et résistants aux sollicitations**

Dans l'industrie aéronautique, le choix des matériaux à utiliser dépend principalement du type de composant, de contraintes spécifiques, de limites géométriques, de la production et de la maintenance [3].

Deux principaux groupes de composants existent sur un avion. Les matériaux utilisés pour ces groupes sont donc différents [4] :

- Matériaux pour les composants structurels
- Matériaux pour le réacteur

En ce qui concerne les matériaux de la structure, ceux-ci doivent pouvoir supporter le poids statique de l'avion et les charges dynamiques liées au décollage, à l'atterrissage,

aux manœuvres et aux turbulences. Ils doivent avoir une densité relativement faible pour réduire le poids tout en conservant de bonnes propriétés thermo mécaniques [5]. Ils doivent être à même de supporter des conditions extrêmes de température, d'humidité et de rayonnement ultraviolet [4]. Les matériaux traditionnellement utilisés sont donc des alliages d'aluminium et de titane. Cependant sur les avions de ligne commerciaux plus récents, ces matériaux sont partiellement remplacés par des composites modernes. Ainsi, l'ensemble du fuselage du Boeing 787 et Airbus A350 XWB est fabriqué en composite époxy-fibre de carbone (Figure 1.1) [6].

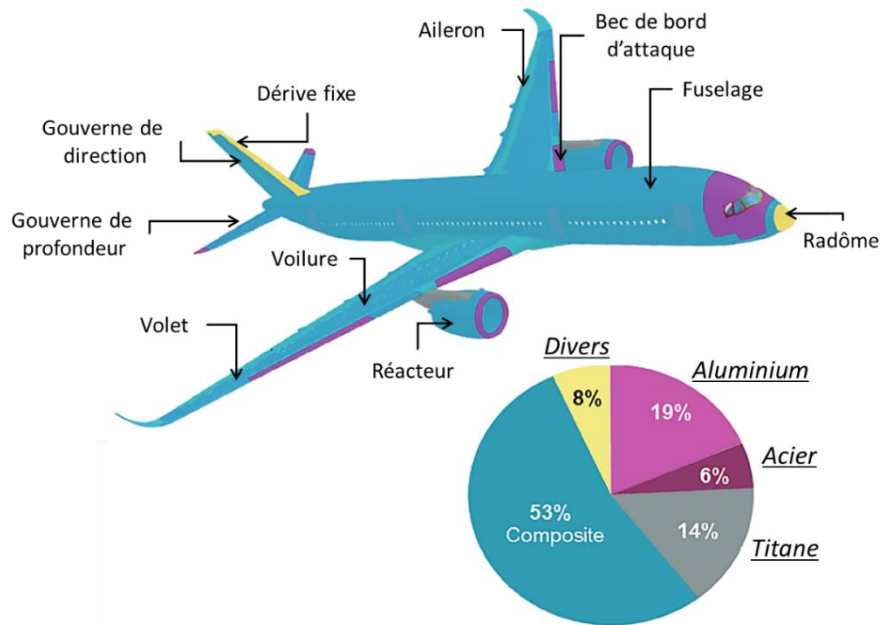


Figure 1.1 – Les matériaux structurels utilisés dans un avion moderne (Airbus A350 XWB) adapté de [4,6]

En ce qui concerne le réacteur, celui-ci se compose de sections froides (fan, compresseur et nacelle) et chaudes (chambre de combustion et turbine) (Figure 1.2).

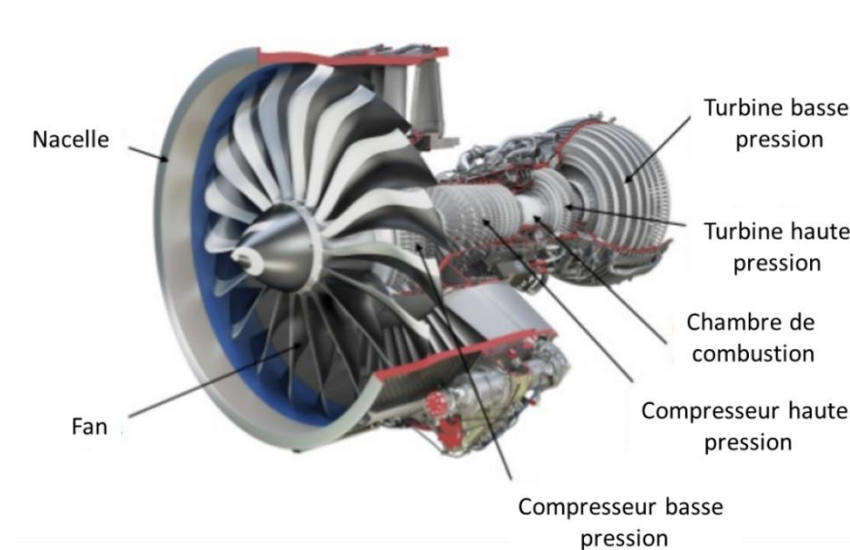


Figure 1.2 – Vue éclatée d'un turboréacteur (adapté de [4])

Le choix du matériau dépend donc fortement des températures de fonctionnement. Les composants de la section froide (500-600 °C) nécessitent des matériaux ayant une résistance mécanique et une résistance à la corrosion élevée. Les alliages de titane et d'aluminium se portent très bien à ce genre d'applications. Pour les sections chaudes (1200-2000 °C), des matériaux ayant une bonne résistance au fluage, de bonnes propriétés mécaniques à température élevée, et une résistance à la corrosion à haute température sont nécessaires. Les superalliages à base de nickel répondent à ces besoins [4].

En résumé, les exigences sur les pièces fonctionnelles aéronautiques sont élevées en termes de propriétés mécaniques et thermiques [1]. Les ingénieurs visent des produits finaux fiables, durables et performants tout en réduisant leur poids [5].

### Un besoin en composants aux formes complexes

En complément, les composants ont souvent des géométries complexes car les applications aéronautiques nécessitent généralement des pièces avec des fonctions intégrées [2]. Cela signifie que les composants de l'avion, en plus de leurs fonctions de base, peuvent effectuer des tâches supplémentaires, comme agir en tant que conducteurs. Par exemple, une aube de turbine a une géométrie complexe et également une structure interne avec des canaux de refroidissement intégrés (Figure 1.3). La géométrie des aubes est déterminée par des fonctions mathématiques complexes pour optimiser l'écoulement des fluides tout en gardant leur résistance mécanique. Ces structures sont donc complexes à réaliser et augmentent les coûts car elles nécessitent le développement et la production d'outils, de montages, de matrices ou de moules spéciaux.

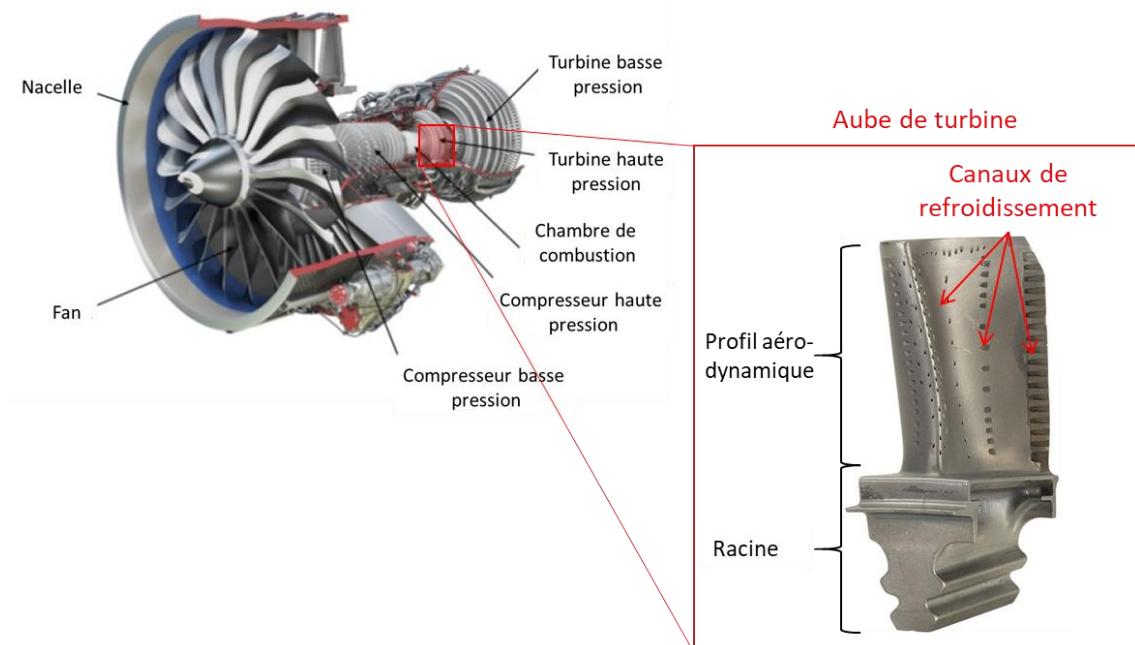


Figure 1.3 – Aube de turbine avec un profil aérodynamique et des canaux de refroidissement (adapté de [2,4])

### **Contraintes de réduction des coûts de fabrication**

D'autre part, sur le plan économique, l'industrie aéronautique vise à réduire les coûts allant de la conception à la fabrication [1]. Ceci peut être réalisé principalement en réduisant le temps de cycle en production, le nombre d'outils, le nombre d'opérations ainsi que la quantité de matière perdue [2].

### **Contraintes environnementales**

Enfin, d'un point de vue environnemental, l'industrie aéronautique doit se concentrer sur la réduction du bruit et des émissions. En ce qui concerne la production des composants, il est nécessaire de réduire les déchets, ainsi que les étapes de traitements, c'est-à-dire d'avoir moins d'assemblages et d'usinages [1]. Cela permettra de réduire considérablement les déchets de production.

## **1.1.2. Les réponses aux besoins**

### **Matériaux : les alliages d'aluminium restent majoritaires**

Les alliages d'aluminium ont toujours été les matériaux les plus utilisés dans l'aéronautique. Même si les matériaux composites émergent récemment (voir Tableau 1.1), les alliages d'aluminium ne perdent pas de leur popularité. Cela s'explique par leur légèreté, leur malléabilité et leur coût relativement faible [4].

Tableau 1.1 – Matériaux utilisés dans les avions Boeing (% du poids) adapté de [4]

Série Boeing	Année de mise en service	Alliages Al	Alliages Ti	Aciers	Composites	Autres
747	1969	81	4	13	1	1
757	1982	78	6	12	3	1
767	1981	80	2	14	3	1
777	1994	70	7	11	11	1
787	2009	20	15	10	50	5

Les alliages d'aluminium de qualité aérospatiale sont souvent mélangés à certains éléments tels que le cuivre (Cu), le magnésium (Mg), le zinc (Zn), lithium (Li) et le manganèse (Mn) qui améliorent sa résistance, sa rigidité ainsi que sa ténacité. Par exemple, les alliages de la série 2XXX (Al – Cu) sont utilisés pour les applications critiques en fatigue (comportement dynamique) car ils sont très tolérants aux dommages; les alliages de la série 7XXX (Al – Zn – Mg – Cu) sont employés pour des applications statiques où une bonne résistance à la rupture est nécessaire [3]. Enfin les alliages Al - Li sont choisis pour les composants qui nécessitent une grande rigidité combinée à une très faible densité [5].

### **La démarche du concepteur pour répondre aux besoins**

Dès la phase de conception il est nécessaire d'équilibrer les divers exigences fonctionnelles avec les contraintes [3]. Les concepteurs sont confrontés au défi de

trouver la solution optimale tout en prenant en compte la conception de géométries complexes, le choix du matériau, leur fabricabilité (Figure 1.4). La fabricabilité signifie que des composants de géométries différentes peuvent être fabriqués à partir de matériaux sélectionnés compte tenu des exigences économiques et environnementales. Par conséquent, la solution optimale se trouve dans la zone d'intersection de ces conditions [3]. À l'heure actuelle, les procédés conventionnels ne peuvent pas toujours répondre à ces conditions. Les industriels du secteur aéronautique manifestent donc un fort intérêt pour les procédés innovants de la fabrication additive, car ceux-ci constituent une alternative intéressante en termes de coût et de flexibilité de conception par rapport aux procédés conventionnels [1].

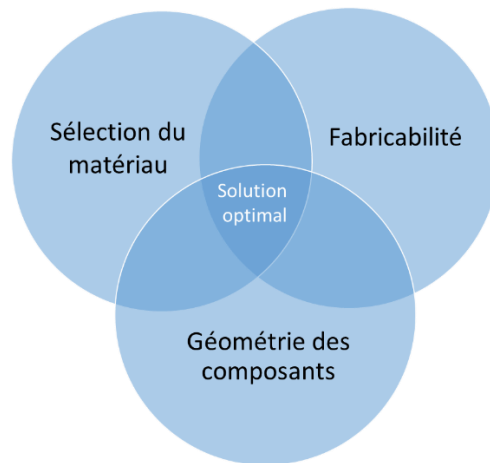


Figure 1.4 – Schéma indiquant l'intersection de la sélection des matériaux, des géométries des composants et la fabricabilité qui détermine la zone de solution optimale (adapté de [3])

### 1.1.3. La fabrication additive : une nouvelle réponse aux besoins aéronautiques

La fabrication additive répond à certains des défis majeurs auxquels est confrontée l'industrie aéronautique. Elle offre une approche nouvelle à la conception et à la production [2]. De ce fait la FA permet de produire des pièces fonctionnelles à la géométrie complexe, de manière rentable (pour petites/moyennes séries de production) et pour un court délai [7].

En fait, la première innovation technologique importante offerte par la FA pour l'industrie aéronautique se matérialise par une grande liberté de conception et la possibilité de créer des formes jusqu'ici impossibles. Effectivement, la fabrication additive est une technologie de fabrication directe qui réduit les contraintes d'outillage (coût, temps, etc.). Elle permet de créer des pièces de forme libre proches des dimensions du produit final (« near net shape ») en une seule étape. Cela permet notamment de réduire le nombre d'assemblages et d'alléger les structures.

Ensuite, les composants produits par la FA peuvent être réalisés sur demande. Ceci réduit fortement les coûts de stockage. C'est également un avantage pour l'industrie aéronautique, qui concerne les petites séries de pièces à forte valeur ajoutée [1].

En outre, la fabrication additive se prête bien aux matériaux à haute performance et peut entraîner une réduction significative du poids des composants. De plus, cette technologie réduit les déchets de production car les pièces sont créées en ajoutant du matériau plutôt qu'en le supprimant [7].

Par conséquent, ces dernières années, le désir d'utiliser les technologies de fabrication additive est grandissant pour l'industrie aéronautique.

## 1.2. La fabrication additive

La fabrication additive a évolué à partir du domaine du prototypage rapide, développé il y a plus de 40 ans pour produire des composants non structurels. Aujourd'hui, la fabrication additive est largement reconnue comme le nouveau paradigme pour la conception et la fabrication de composants de haute performance [7].

### 1.2.1. Généralités sur les procédés de fabrication additive

La fabrication additive s'oppose à la fabrication soustractive où la matière est retirée pour obtenir la forme désirée [8]. Il s'agit d'un groupe de procédés de fabrication dans lesquels la pièce finale est formée directement à partir d'un modèle CAO tridimensionnel en ajoutant du matériau couche par couche [9]. Au début de son développement (fin 1980), cette technologie aussi communément appelée « impression 3D » a principalement été utilisée pour le prototypage rapide. Cependant, les fabricants ont rapidement découvert le potentiel offert par ces nouveaux procédés de fabrication [10]. Effectivement, ceux sont des procédés polyvalents, avec de multiples possibilités d'application, flexibles permettant une forte personnalisation convenant à de nombreux secteurs industriels [11]. À ce jour, conformément à la norme ISO 52900:2015, les technologies de fabrication additives peuvent se regrouper en sept catégories (Tableau 1.2).

Tableau 1.2 – Les sept principales technologies de fabrication additive selon la norme ISO 52900:2015 (adapté de [8])

Procédé	Principe de base
Laminage de feuilles ( <i>Sheet Lamination – SL</i> )	Les feuilles de matière sont liées entre elles pour former un objet complet (un laser ou un couteau est utilisé pour couper une bordure autour de la pièce souhaitée).
Photopolymérisation en cuve (Vat <i>Photopolymerisation – VP</i> )	Un objet est créé dans une cuve en durcissant un photopolymère de résine liquide à l'aide d'une lumière ultraviolette (UV) dirigée à travers des miroirs.
Extrusion de matériaux ( <i>Material Extrusion – ME</i> )	La matière en rouleau est extrudée ou étirée à travers une buse chauffée montée sur un bras mobile.
Jetting ( <i>Material Jetting – MJ</i> )	Des gouttelettes de matériaux de construction sont déposés (une tête d'impression se déplace le long des axes x, y et z pour créer des objets 3D).

Jet de liant ( <i>Binder Jetting – BJ</i> )	Impression par jet d'un liant liquide sur de fines couches de poudre (une partie est augmentée par l'alternance de couches de poudre et de liant liquide).
Dépôt d'énergie dirigé ( <i>Direct Energy Deposition – DED</i> )	L'énergie thermique focalisée fait fondre les matériaux pendant le dépôt
Fusion de lit de poudre ( <i>Powder Bed Fusion – PBF</i> )	L'énergie thermique fusionne une petite région du lit de poudre du matériau de construction

Tous ces procédés peuvent être classés selon l'état de la matière première (liquide, solide), la manière d'assembler le matériau (buse chauffée, liant, etc.) et la pertinence de famille de matériaux utilisables (plastiques, métaux, céramiques, etc.) [12]. Cette classification est représentée par la Figure 1.5 [8].

Parmi ces procédés, seuls quelques-uns (marqués par une pertinence " très haute" sur le schéma) peuvent produire des pièces métalliques répondant aux exigences présentées à la section 1.1 : il s'agit des procédés PBF et DED présentés dans la sous-section suivante.

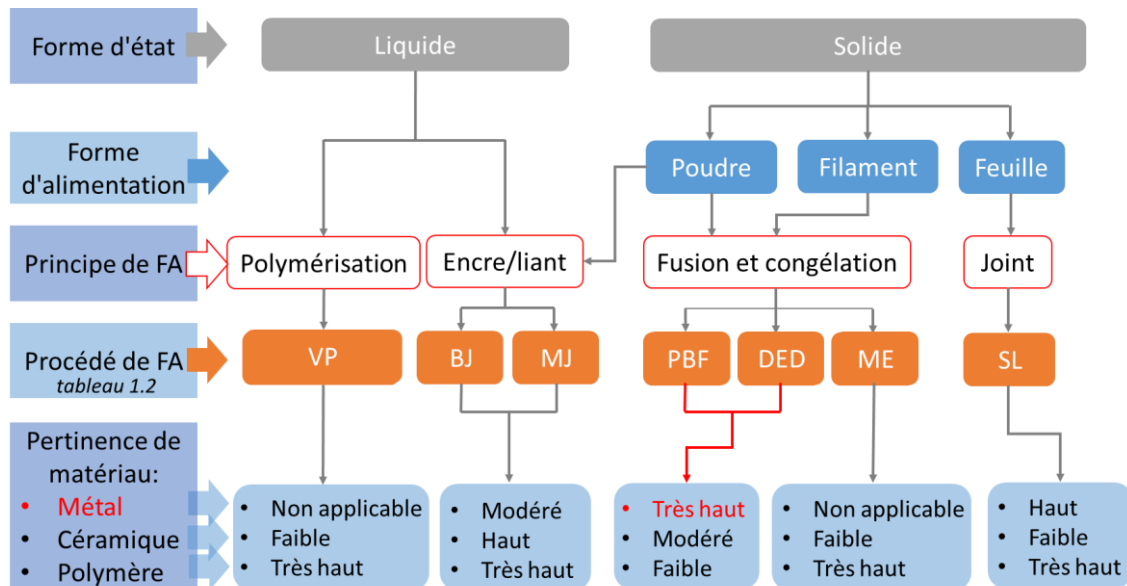


Figure 1.5 – Schéma de classification des principales technologies de FA selon l'état des matières premières, le forme d'alimentation, le principe de fabrication et la pertinence de matériaux utilisables adapté de [8] (VP – vat photopolymerization; BJ – binder jetting; MJ – material jetting; PBF – powder bed fusion; DED – directed energy deposition; ME – material extrusion and SL – sheet lamination)

### 1.2.2. Procédés PBF et DED pour la réalisation de pièces métalliques

Les procédés les plus intéressants pour la fabrication additive métallique sont les suivants (Figure 1.6):

- La fusion sur lit de poudre (PBF : Powder Bed Fusion);
- Le dépôt de matière sous énergie concentrée (DED : Direct Energy Deposition).

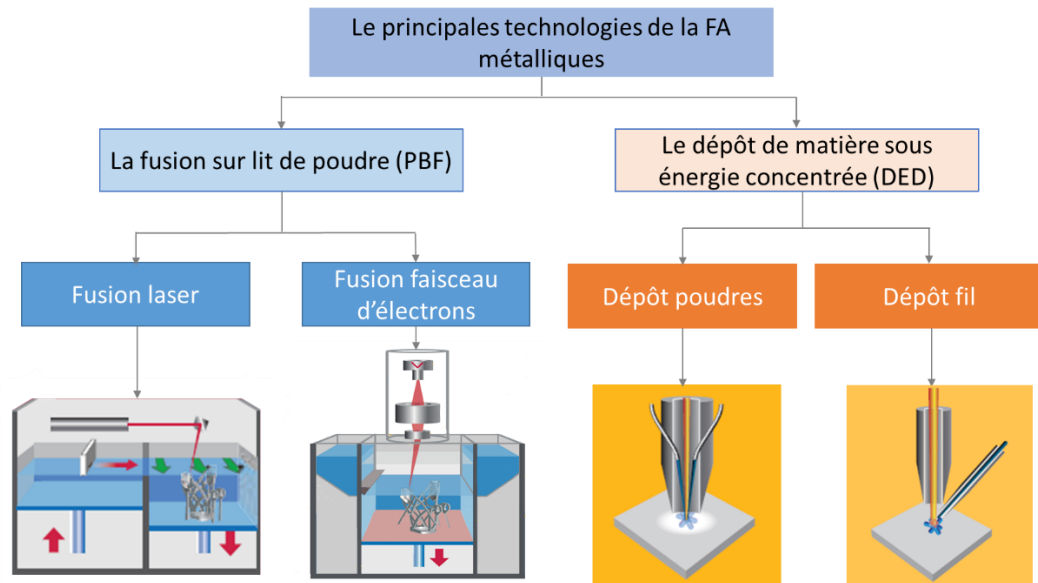


Figure 1.6 – Classification des principales technologies de la FA métallique adapté de [13]

La nature de la source d'énergie principale est un laser, un faisceau d'électrons ou un arc électrique [13]. La matière première peut être sous forme de poudre ou de fil. Ces procédés diffèrent également par la taille maximale du composant fabriqué, la taille de faisceau, le temps de production et la capacité à produire des pièces complexes à haute précision dimensionnelle (Tableau 1.3) [12-14]. Par exemple le procédé de fusion sur lit de poudre à l'aide d'un faisceau d'électrons (appelé EBM) est beaucoup plus rapide que le procédé de fusion sur lit de poudre par laser (LPBF ou SLM), mais l'état de surface est de mauvaise qualité. En revanche le procédé LPBF a une meilleure qualité de surface car il utilise un faisceau de plus faibles dimensions par rapport aux technologies DED et EBM. Cependant, il faut plus de temps pour réaliser une pièce. Par conséquent le procédé LPBF est bien adapté aux objets de petite taille plus précis et plus complexes, tandis que le DED convient mieux à la construction de pièces plus grandes grâce à une vitesse de construction plus élevée.

Tableau 1.3 – Comparaison de certaines techniques d'additives métalliques sur la base de plusieurs références [12-14]

	Fusion sur lit de poudre par laser (LPBF ou SLM)	Fusion sur lit de poudre à l'aide de faisceau d'électrons (EBM)	Le dépôt de matière sous énergie concentrée (DED)
Volume de construction	—	—	—
Diamètre du faisceau	0.1-0.5 mm	0.2-1 mm	2-4 mm
Épaisseur de couche	20-100 $\mu\text{m}$	50-200 $\mu\text{m}$	40-1000 $\mu\text{m}$
Vitesse de construction	5-20 $\text{cm}^3/\text{h}$	55-80 $\text{cm}^3/\text{h}$	300 $\text{cm}^3/\text{h}$
Finition de surface	Ra 8-30 $\mu\text{m}$	Ra 25-35 $\mu\text{m}$	Ra 20-50 $\mu\text{m}$



### 1.2.3. LPBF pour la réalisation de pièces métalliques de précision

La thèse se limitera à l'étude du procédé LPBF permettant de générer des formes plus fines et complexes avec des rugosités plus intéressantes que les autres procédés [15]. Le procédé LPBF utilise une source laser pour fondre la poudre métallique couche par couche et ainsi générer un volume de pièce [16]. Comme le montre la Figure 1.7, le cœur d'une machine LPBF se compose d'un faisceau laser, d'un piston de distribution de poudre et d'un plateau de fabrication sur piston également. Un système de mise en couche (rouleau ou racleur dur) permet d'alimenter en poudre le plateau de fabrication en étalant celle-ci. Le procédé se déroule à l'intérieur d'une chambre à atmosphère contrôlée (gaz inerte tel que de l'argon). Le choix du gaz est défini par les éléments principaux d'alliage de la poudre métallique utilisée [17].

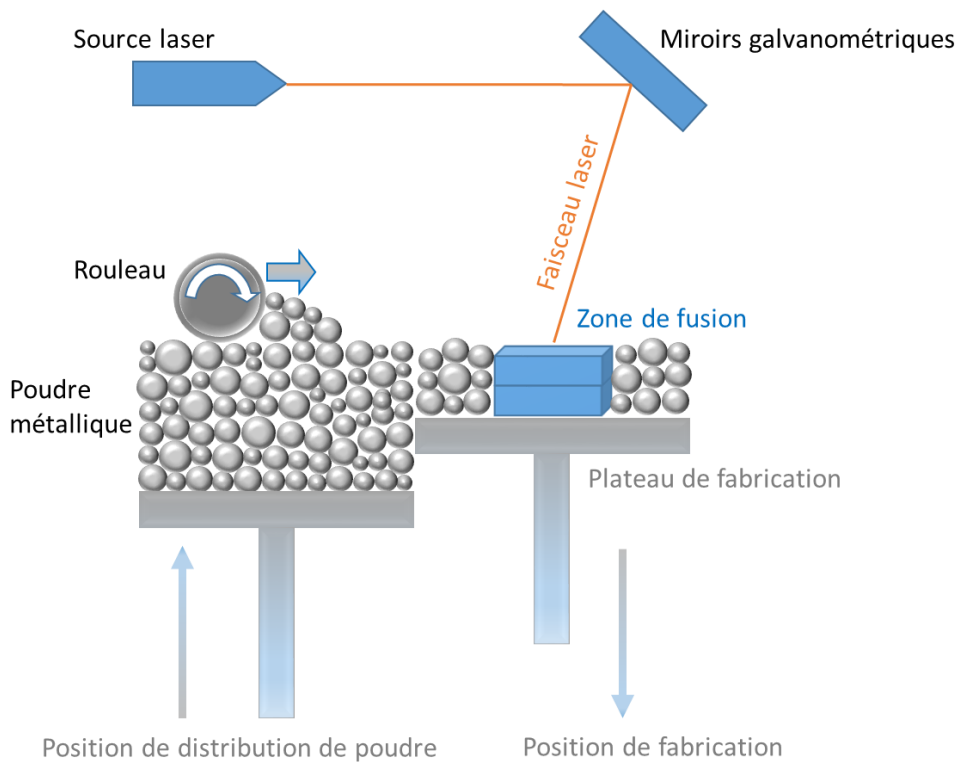


Figure 1.7 – Représentation du procédé de fusion sur lit de poudre par laser (LPBF)

A l'étape initiale une fine couche de poudre est étalée sur le plateau de fabrication par le rouleau/racleur (Figure 1.8). Un faisceau laser, fusionne la matière dans une zone prédéterminée (algorithme de balayage généré par un logiciel de FAO). La fusion forme des cordons de matière fondue. La combinaison séquentielle de ces cordons, qui ensuite se solidifient en refroidissant, crée les couches requises [15]. Ensuite, le plateau de construction s'abaisse et le rouleau/racleur dépose une nouvelle couche de poudre. Le procédé est répété couche par couche jusqu'à ce que la pièce 3D souhaitée soit produite [17].

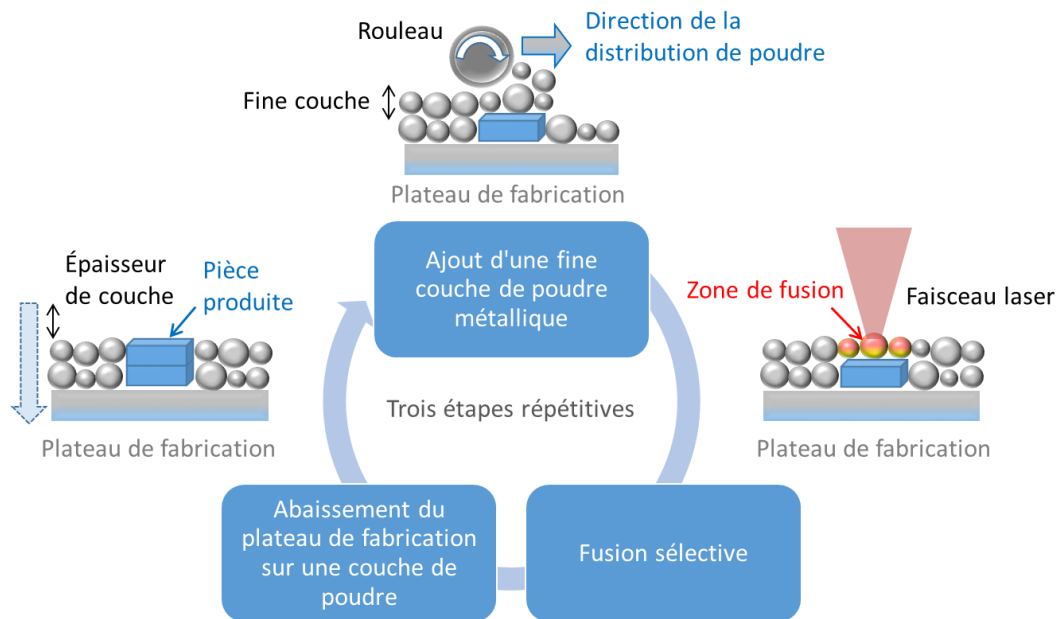


Figure 1.8 – Déroulement du procédé de LPBF

Cette méthode de création d'un objet conduit à la formation d'un volume et de deux surfaces très distinctes (Figure 1.9):

- Une surface supérieure, formée par la combinaison des cordons de la dernière couche;
- Une surface latérale, formée par la combinaison des extrémités de cordons de début et de fin de toutes les couches.

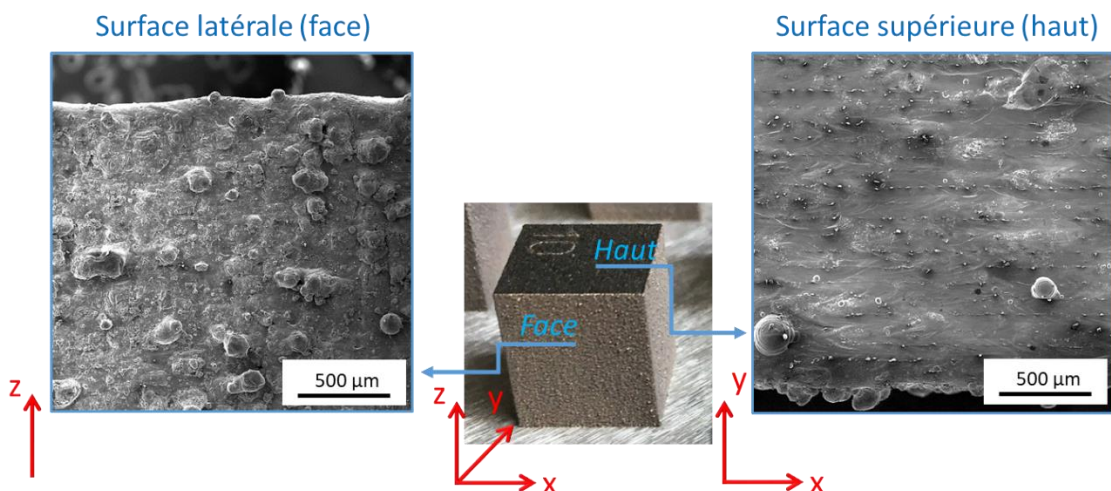


Figure 1.9 – Un échantillon réalisé par LPBF et deux surfaces distinctes: surface supérieure et surface latérale

#### 1.2.4. Les défis du procédé LPBF

Parmi les technologies additives, le procédé LPBF offre une grande précision géométrique. Toutefois, à ce jour, la rugosité de surface obtenue (surface supérieure  $Ra$  : 8 à 20  $\mu\text{m}$ , surface latérale  $Ra$  15 à 35  $\mu\text{m}$ ) est plutôt élevée par rapport aux procédés

de fabrication conventionnels, tels que le fraisage ( $Ra : 0.8$  à  $6.3 \mu\text{m}$ ) ou le tournage ( $Ra: 0.4$  à  $6.3 \mu\text{m}$ ) [14].

Selon certaines études, il semble difficile d'atteindre simultanément un  $Ra$  optimum pour les surfaces supérieures et les surfaces latérales. En effet, différents mécanismes sont responsables de la génération de ces surfaces [18].

Ainsi, les topographies de surface obtenues limitent encore la mise en œuvre industrielle pour des pièces à fortes exigences (haute précision, longue durée de vie en fatigue...). L'état de surface et donc la fonctionnalité des pièces produites peuvent être améliorés par différents post-traitements [19]. Ces technologies augmentent le temps et les coûts de production. De surcroît, il n'est pas toujours possible d'appliquer ces post-traitements permettant de réduire la rugosité de surface : en effet, l'accès aux surfaces externes (structures en treillis) et internes (canaux) générées peut parfois être limité (Figure 1.10). La finition n'est pas toujours possible et les surfaces restent donc proches de leur état initial (brut de fabrication additive). Ceci engendre une fonctionnalité dégradée de la pièce (diminution conséquente de la résistance à la fatigue [89]). Un autre exemple de fonctionnalité dégradée concerne le cas du transfert de chaleur et du transport de liquides dans des pièces ayant de petits canaux de refroidissement tortueux : la rugosité à l'intérieur de ces canaux peut engendrer d'importantes pertes de charge [20-21].

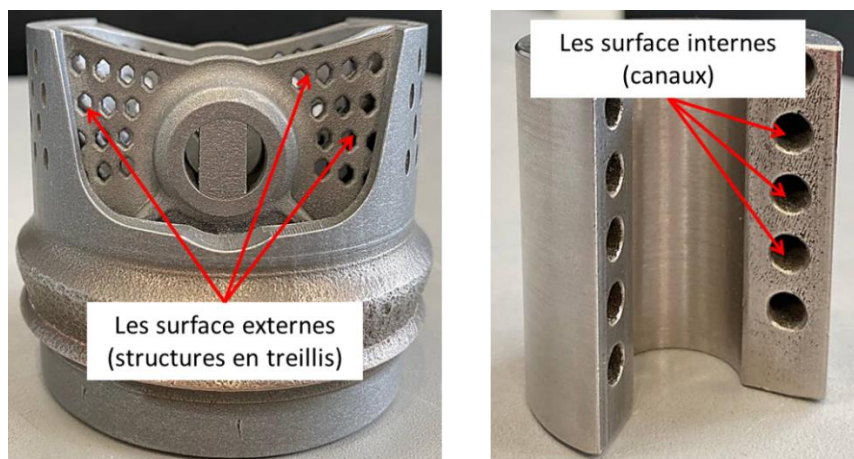


Figure 1.10 – Exemple de pièces fabriquées par le procédé LPBF avec des surfaces difficiles d'accès pour le post-traitement

Par conséquent, les surfaces brutes issues du procédé LPBF sont importantes à étudier et à améliorer. Une meilleure compréhension de ce procédé et de la génération des surfaces est donc nécessaire.

### 1.3. Généralités sur la caractérisation des topographies de surface

#### 1.3.1. Définitions

Une surface solide, ou plus précisément une interface solide-gaz ou solide-liquide, a une structure et des propriétés complexes [22]. Ces caractéristiques dépendent de la nature des solides, de la méthode de production de la surface et de l'interaction entre

la surface et l'environnement. Par exemple, dans les procédés de formage (moulage ou forgeage) la finition de la surface de la matrice détermine la finition de la surface de la pièce. Autre exemple, en usinage, l'interaction des arêtes de coupe avec la microstructure du matériau à usiner contribue à l'état de surface final.

Toutes les surfaces, quel que soit leur mode de production, contiennent des irrégularités ou des écarts par rapport à une forme géométrique théorique parfaite (surface nominale) [22]. En général, ces caractéristiques de surface définissent le concept de topographie de surface [23].

La topographie est le terme généralement utilisé pour décrire l'ensemble des informations géométriques associées à une forme de surface et à ses caractéristiques. Elle comprend: (1) la rugosité, (2) l'ondulation et (3) la forme [22] (Figure 1.11).

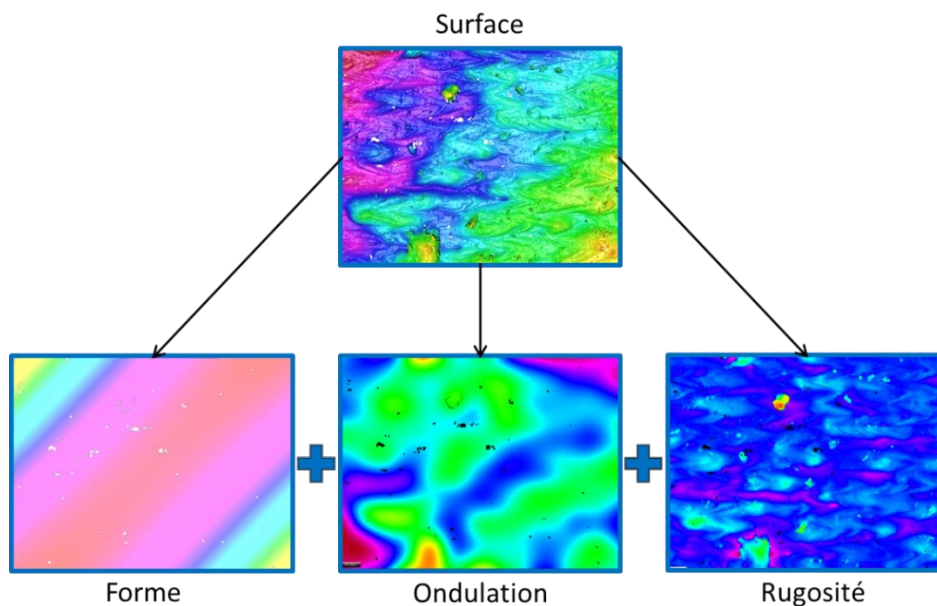


Figure 1.11 – Les différentes composantes d’une topographie de surface produite par le procédé LPBF

L'écart de forme est la composante de longueur d'onde élevée d'une topographie. Cela peut être causé par une erreur dans le guidage d'une machine-outil, un mauvais serrage de la pièce, une usure irrégulière. L'ondulation est la mesure des irrégularités de surface ayant des longueurs d'onde intermédiaires, généralement causées par les vibrations et des déflexions [22]. La rugosité est produite par des fluctuations de courtes longueurs d'onde et se caractérise donc par des aspérités (maxima locaux) et des vallées (minima locaux) d'amplitudes et d'espacements variables. Elle peut être causée par les marques d'outils de coupe, la granulométrie d'une meule, etc. La rugosité comprend également divers défauts de surface. Ils sont des interruptions de texture inattendus et involontaires [24]. Ils comprennent: rayures, pores, fissures, bavures, etc.

La rugosité est la composante de la topographie la plus souvent étudiée car considérée comme étant la plus importante. Elle est responsable de nombreuses dégradations fonctionnelles (frottement élevé, mauvaise lubrification, usure élevée, corrosion importante, réflexion de la lumière plus diffuse, transfert de chaleur local, fatigue prématurée) [22]. Il est donc important de contrôler cette composante et, si



nécessaire, d'optimiser les procédés de fabrication afin d'obtenir des pièces adaptées à l'application prévue [24].

De ce fait, l'analyse topographique est une étape essentielle de l'évaluation de l'état de surface, qui permet de contrôler le niveau de rugosité [25]. Elle se décompose en trois étapes [26] (Figure 1.12): acquisition des topographies, prétraitement des topographies et caractérisation des topographies (post-traitement) [27].

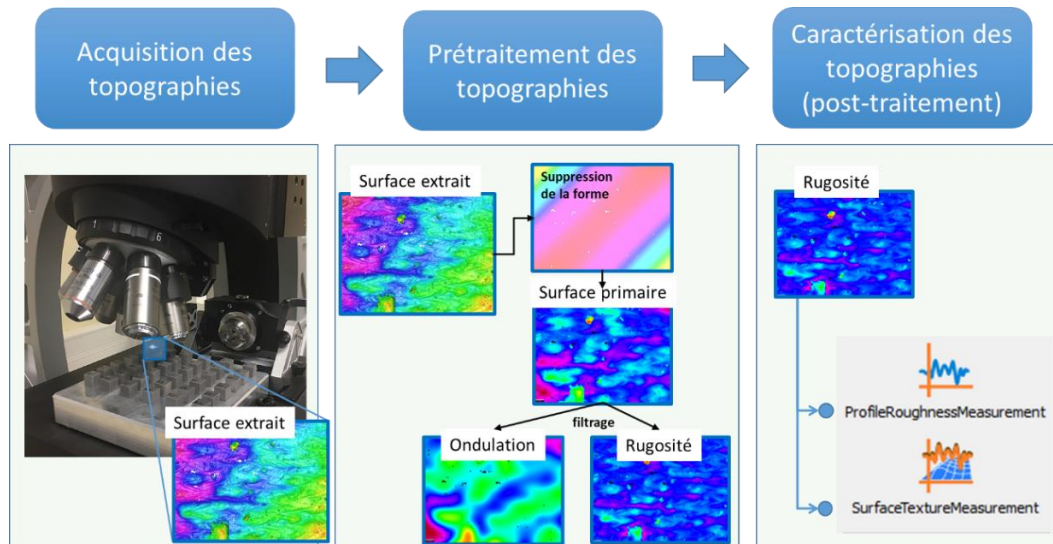


Figure 1.12 – Trois grandes étapes dans l'analyse de la topographie de surface

### 1.3.2. Acquisition des topographies

L'acquisition de topographies de surface peut être effectuée par mesure de profils dits « 2D » ou de surfaces dites « 3D » (ISO 25178-6:2010) (Figure 1.13). La mesure de profil est la mesure d'une ligne à travers la surface qui peut être mathématiquement représentée en fonction de la hauteur avec un décalage latéral,  $Z=f(X)$ . La mesure de surface 3D est la mesure d'une zone sur la surface, qui peut être mathématiquement représentée en fonction de la hauteur avec déplacement dans un plan,  $Z=f(X, Y)$  [25].

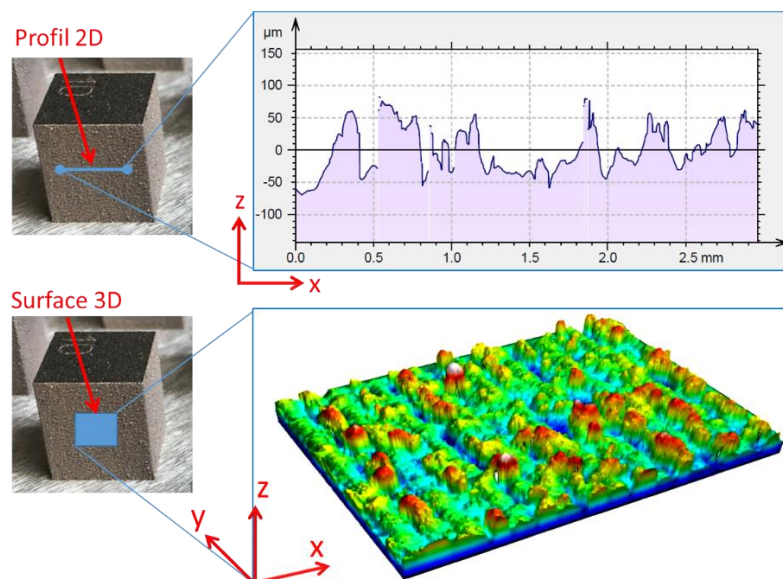


Figure 1.13 – Représentation des mesures de profil 2D et de surface 3D

### 1.3. Généralités sur la caractérisation des topographies de surface

Dans l'industrie, les mesures de profils sont encore très populaires. Malgré cela, il a été constaté que la mesure de surface 3D présente des avantages évidents par rapport à la mesure de profil [27]. En effet, la topographie de surface est de nature tridimensionnelle. Par conséquent, une analyse utilisant des profils (données bidimensionnelles) ne décrira pas complètement la surface et peut donner des résultats trompeurs.

Différents moyens d'acquisition existent pour la mesure de profils et de surfaces 3D [25]. Ceux-ci peuvent être classés en différents groupes, en fonction de la technique de mesure (Figure 1.14) et de la résolution (échelles verticale et latérale (Figure 1.15) utilisée pour obtenir les topographies [26]. Trois grandes familles d'instruments se dégagent : mesure par contact, mesure sans contact et mesure à pseudo contact [28].

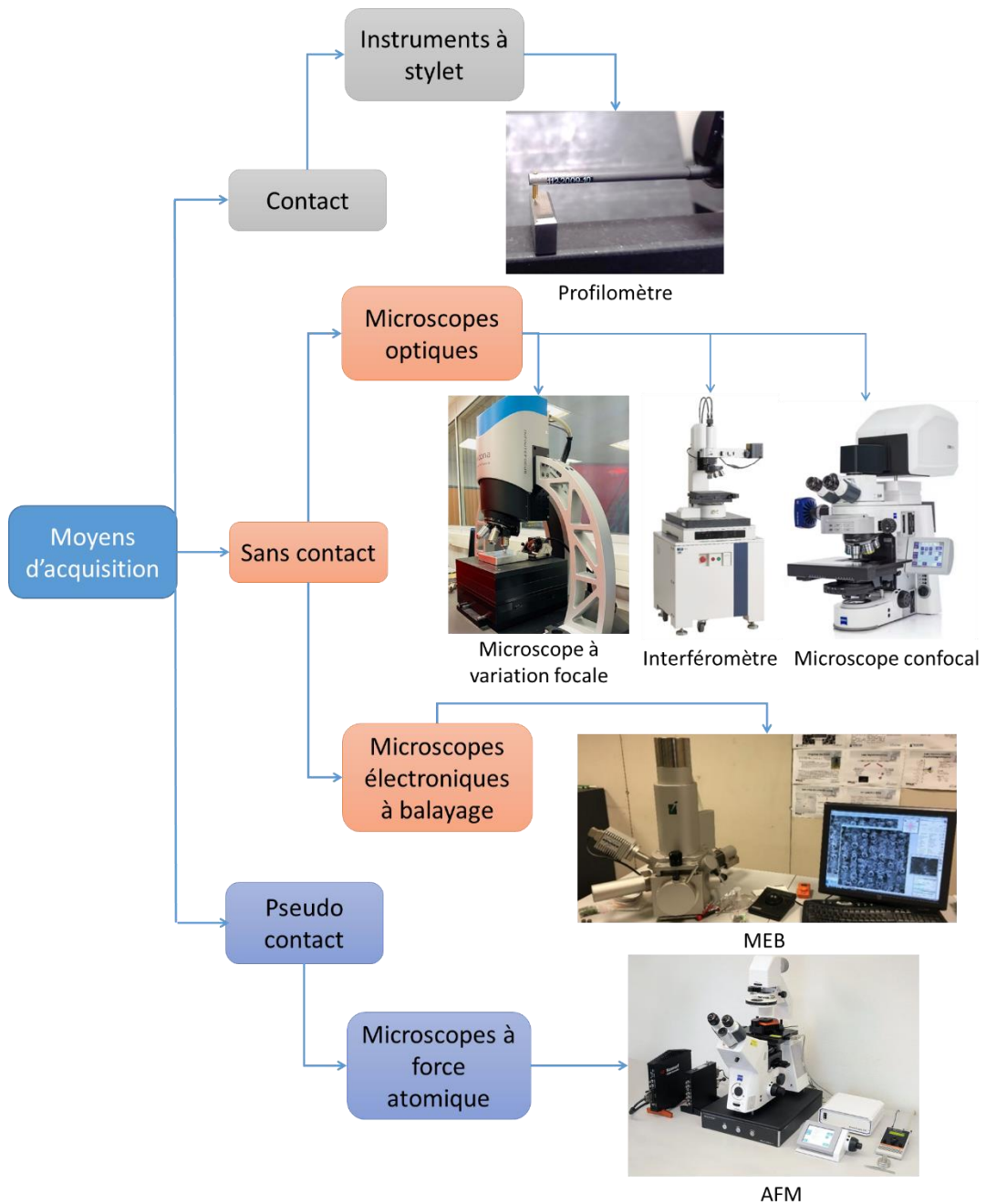


Figure 1.14 – Différents moyens d'acquisition de topographies de surface

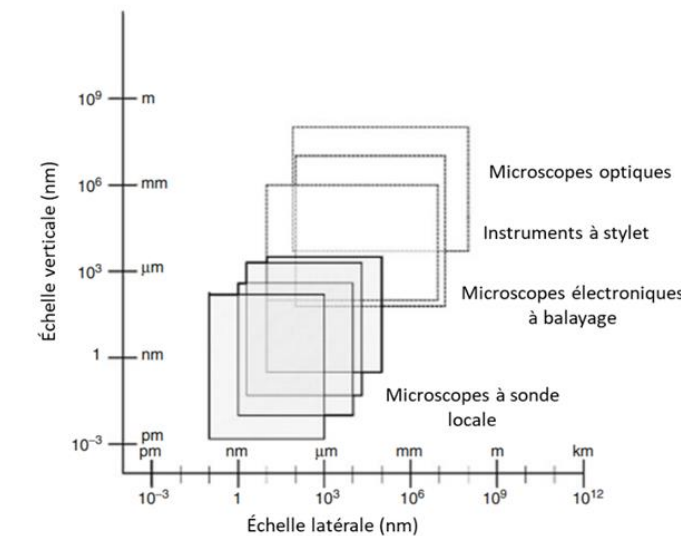


Figure 1.15 – Résolution de moyens d'acquisition [25,30]

Les moyens d'acquisition à contact comprennent les instruments à stylet. Ils sont constitués d'une pointe en diamant (rayon typique de  $2 \mu\text{m}$ ) qui entre physiquement en contact avec la surface mesurée. Un transducteur vient convertir le mouvement vertical du stylet en signal électrique. Le signal électrique subit une amplification et une conversion analogique/numérique afin d'être enregistré. Les instruments à stylet déterminent le profil de la surface en déplaçant le stylet parallèlement à la surface de mesure. En outre, ils peuvent également être utilisés pour mesurer la surface 3D en combinant une série de profils 2D espacés d'une certaine résolution [26].

Les moyens d'acquisition sans contact et au pseudo contact comprennent des instruments optiques, les microscopes électroniques à balayage et les microscopes à sonde locale notamment les microscopes à force atomique [25].

Le principe de mesure des instruments optiques est basé sur la réflexion de la lumière de la surface. Dans ce cas, une surface peut être considérée comme un objet de phase composé d'inhomogénéités de phase. La lumière réfléchi sur la surface et sa détection ultérieure permet d'évaluer la topographie. La lumière est facile à générer à l'aide de diodes électroluminescentes ou de lasers, et à détecter à l'aide de photodétecteurs ultrasensibles. Par conséquent, un certain nombre de techniques optiques ont été développées pour les mesures de profil et de surface. À ce jour, l'interférométrie, la microscopie à variation de focus et la microscopie confocale sont les plus largement utilisées [28]. Le principe du microscope à variation de focus utilisé dans cette thèse est décrit plus en détail au Chapitre 2.

Les microscopes électroniques à balayage (MEB) ont une haute résolution latérale (jusqu'à  $10 \text{ nm}$ ) (figure 1.10). Ils utilisent un faisceau focalisé d'électrons à haute énergie pour générer une variété de signaux à la surface des échantillons solides. Les signaux qui générés par les interactions électrons-échantillon révèlent des informations sur l'échantillon dont la topographie et la composition de la surface. La mesure est effectuée dans une chambre sous vide [25]. Cependant un MEB ne permet pas d'obtenir les données  $Z=f(X,Y)$ .

### 1.3. Généralités sur la caractérisation des topographies de surface

Les microscopes à force atomique (AFM) peuvent être considérés comme des moyens de mesure à pseudo contact. Son principe consiste à mesurer la force d'interaction entre l'atome de la pointe et les atomes de la surface [25]. L'image topographique de surface est obtenue par l'enregistrement de la déflexion de la pointe pour chaque position du plan (x, y). Il permet également de réaliser des images topographiques de surface à haute résolution.

Les moyens d'acquisition à contact, sans contact et au pseudo contact présentent différents avantages et inconvénients (résumés dans le Tableau 1.4). Il est donc important de sélectionner l'instrument le plus approprié en fonction de l'application.

Tableau 1.4 – Avantages et inconvénients des moyens de mesure à contact et sans contact adapté de [31]

Types d'instruments de mesure	Avantages	Inconvénients
Instruments à stylet (Profilomètre)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le système est très simple.</li> <li>• Mesure de la topographie en 2D rapide.</li> <li>• Palpage de surface inclinée (jusqu'à 45°).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usure du stylet.</li> <li>• Risque de rayures.</li> <li>• Ne convient aux surfaces de formes complexes.</li> <li>• Mesure limitée par le rayon de la pointe du stylet.</li> <li>• Faible vitesse d'acquisition.</li> <li>• Sensible aux vibrations.</li> </ul>
Interféromètre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Méthode adaptée pour rugosité très fine.</li> <li>• Résolution verticale meilleure que les autres méthodes optiques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ne convient qu'aux surfaces réfléchissantes.</li> <li>• Caractéristique angulaire limitée.</li> <li>• Très faible surface inspectée (de l'ordre du mm<sup>2</sup>).</li> <li>• Les surfaces rugueuses sont difficiles à mesurer.</li> <li>• Très sensible aux vibrations.</li> </ul>
Microscope à variation focale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peut fournir des informations de couleur.</li> <li>• Mesure des surfaces rugueuses.</li> <li>• Vitesse de mesure élevée lors de la mesure de grandes surfaces.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible profondeur de champ.</li> <li>• Haute sensibilité aux changements de caractéristiques de la surface.</li> </ul>
Microscope confocal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Haute résolution latérale.</li> <li>• Convient aux échantillons poreux, courbés, spéculaires ou transparents.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le temps d'acquisition est long.</li> <li>• Ne convient pas aux échantillons de faible réceptivité ou absorbants.</li> <li>• Faible surface inspectée (quelques mm<sup>2</sup>).</li> <li>• Très sensible aux vibrations.</li> </ul>



Microscope électronique à balayage (MEB)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agrandissement et haute résolution.</li> <li>• Analyse chimique.</li> <li>• Images de haute qualité.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût.</li> <li>• Images monochromes.</li> <li>• Préparation préalable des échantillons.</li> <li>• Grandes tailles.</li> <li>• La mise sous vide.</li> <li>• Besoin de formation.</li> </ul>
Microscopes à force atomique (AFM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Résolution nanométrique.</li> <li>• Appareil peu encombrant.</li> <li>• Possibilités de mesure sur différents matériaux.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Champ réduit (10 <math>\mu\text{m}</math> x 10 <math>\mu\text{m}</math>).</li> <li>• Temps de mesure relativement long.</li> <li>• Usure rapide d'une pointe.</li> <li>• Besoin d'un opérateur ("skilled") bien formé.</li> </ul>

Les facteurs suivants peuvent donc influencer le choix de l'instrument de mesure [25]:

- Type de surface à mesurer, sa géométrie et son matériau. Par exemple, l'instrument peut-il être en contact avec la surface à mesurer ou non ?
- Taille de l'objet à mesurer. Certains instruments ont des limites de taille pour les objets qui peuvent être placés sur la table de mesure.
- La vitesse de mesure requise. Par exemple, les méthodes optiques ont des temps de mesure plus courts que les instruments à stylet.
- Incertitude de mesure requise.
- Coût de l'instrument de mesure. Le prix peut aller de quelques milliers d'euros pour un profilomètre à stylet, à plusieurs centaines de milliers d'euros pour un microscope à force atomique ou un instrument optique avec logiciel.

### 1.3.3. Prétraitement des topographies

La première étape d'analyse après l'acquisition des topographies consiste à prétraiter les données brutes. Cette procédure a approximativement la même séquence pour les mesures de profil et de surface et comprend deux étapes principales [28]:

- Suppression de la forme (ou Opérateur  $F$  dans le cas de mesures surfaciques souvent appelées 3D). La déformation de la surface par rapport à la forme nominale (ligne, polynôme, cercle, etc.) est causée par des erreurs géométriques survenant pendant la production. En outre, une distorsion de forme peut se produire pendant le processus de mesure en raison du positionnement incorrect de la surface par rapport à la base de mesure.
- Le filtrage: filtres  $S$  et  $L$  (cas de mesures surfaciques dites 3D) ou filtre avec longueur de coupure  $\lambda c$  (cas de mesures de profils dits 2D). Ce filtrage est nécessaire pour séparer le signal en deux composantes : les grandes longueurs d'onde (appelées ondulation) et les faibles longueurs d'ondes (appelées rugosité).

Le principe de prétraitement est de passer de la surface réelle à la surface souhaitée par l'utilisation de filtres. Les filtres sont sélectionnés en fonction de la surface à obtenir: une surface primaire, une surface d'ondulation ou une surface de rugosité. La Figure 1.16 illustre la chaîne de prétraitement de mesure de surface (ISO 25178-2:2012). Une surface mesurée par un moyen de mesure est appelé une surface extraite. L'Opérateur  $F$  est une opération de suppression de forme. Le Filtre  $S$  retire les composantes à courte longueur d'onde. Le Filtre  $L$  retire les composantes à grande longueur d'onde. Les surfaces à échelle limitée - surface  $SF$  (équivalent à l'ondulation) ou surface  $SL$  (équivalent à la rugosité) - sont obtenues par l'application des filtres respectifs. Les paramètres calculés sont dénommés  $S$  quelle que soit la surface étudiée.

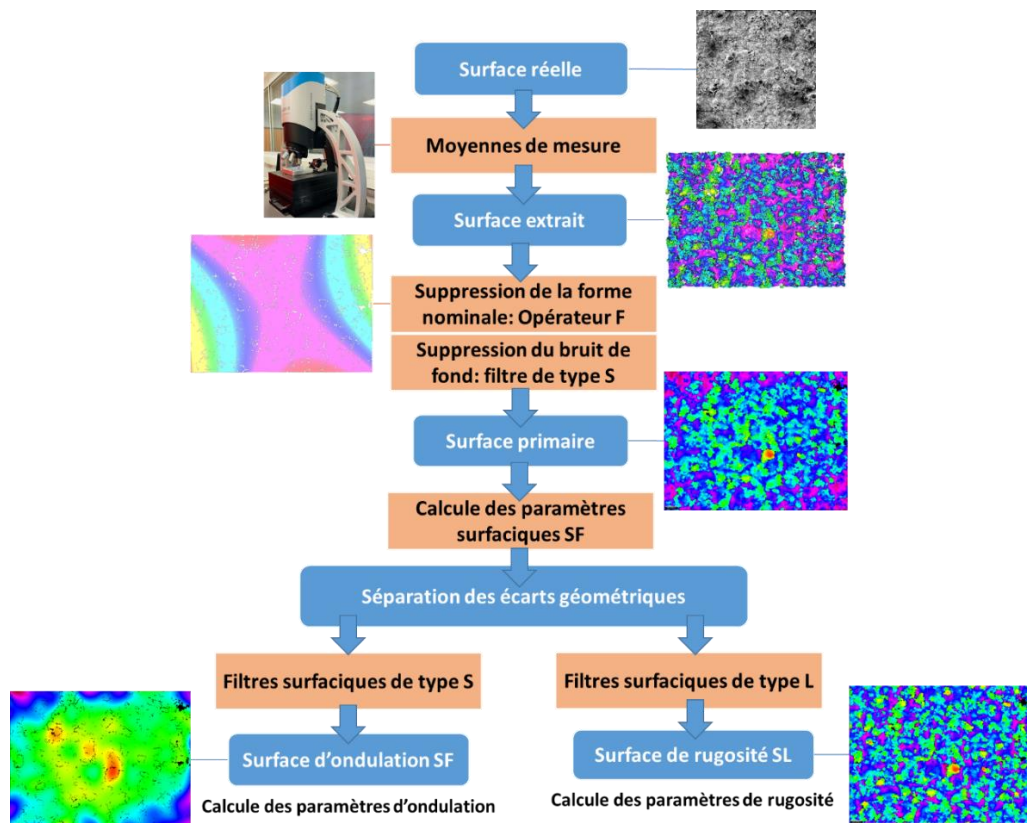


Figure 1.16 – Représentation schématique du prétraitement a) des profils et b) des surfaces extraites en utilisant différentes techniques de filtration

#### 1.3.4. Caractérisation des topographies

Après avoir filtré les données de profil ou surface, la ligne moyenne (ou le plan moyen) est définie et la phase de post-traitement commence [28]. À ce stade, les caractéristiques de la surface peuvent être quantifiées à l'aide de paramètres de profil (paramètres  $P$ ,  $W$  et  $R$ ) et de surface (paramètres  $S$ )[29].

Le paramètre le plus ancien et le plus couramment utilisé est la rugosité moyenne ( $Ra$ ), également connue sous le nom d'écart moyen arithmétique du profil. La valeur  $Ra$  indique la rugosité moyenne de la surface pour la longueur de la mesure effectuée, c'est-à-dire, l'écart moyen entre les pics et les creux [22].

Cependant, le paramètre  $Ra$  donne des informations limitées sur la surface. Par conséquent, un ensemble supplémentaire de paramètres a été défini pour mieux

comprendre la surface et ses fonctions [24]. Ces paramètres sont généralement regroupés en fonction de l'attribut de surface auquel ils sont associés, comme la hauteur ou les objets spatiaux, ou une combinaison des deux (hybride) [25]. Un groupe supplémentaire, dérivé de la fonction de distribution de l'amplitude du profil, fournit des informations sur la forme de la surface et sa netteté [31]. La notation  $S$  est utilisée pour les paramètres de surface afin de les distinguer des paramètres de profil  $P$ ,  $R$  et  $W$ . Un certain nombre de paramètres surfaciques sont des équivalents tridimensionnels directs des paramètres de profil tels que  $Sq$  ( $Rq$ ) et  $Sku$  ( $Rku$ ). En revanche, d'autres paramètres sont spécifiques aux surfaces 3D et peuvent par exemple déterminer des directions de texture [32]. Le Tableau 1.5 présente quelques paramètres couramment utilisés.

Tableau 1.5 – Les paramètres de surface et profil principaux selon la norme ISO 4287:1997 et ISO 25178-2:2012

Définition	Paramètre de surface	Paramètre de profil
Paramètres de hauteur		
Écart moyen arithmétique	$Sa$	$Ra$
Écart moyen quadratique	$Sq$	$Rq$
Hauteur maximale de pic	$Sp$	$Rp$
Hauteur maximale de creux	$Sv$	$Rv$
Amplitude maximale de la surface	$Sz$	$Rz$
Facteur d'asymétrie	$Ssk$	$Rsk$
Facteur d'aplatissement	$Sku$	$Rku$
Paramètres latéraux		
Longueur d'autocorrélation	$Sal$	-
Ratio d'aspect de texture	$Str$	-
Direction de la texture	$Std$	
Paramètres hybrides		
Courbure moyenne quadratique de la surface	$Sdr$	-
Ratio de la surface développée	$Sdq$	$R\Delta q$
Fonctions et paramètres associés		
Paramètres linéaires de surface portante	$Sk$	$Rk$
	$Spk$	$Rpk$
	$Svk$	$Svk$

## 1.4. Topographies de surface en Fabrication Additive

### 1.4.1. Génération de surfaces en FA

Les pièces produites par la fabrication additive ont une topographie de surface différente par rapport aux pièces produites par des procédés soustractifs traditionnels. Les surfaces générées par le procédé LPBF peuvent être divisées en deux groupes (Figure 1.17) [23]:

- Les surfaces situées dans le plan XY parallèles au lit de poudre
- Les autres surfaces dites latérales

Le premier groupe comprend les surfaces supérieures et inférieures. La surface inférieure est la première couche de la pièce. Elle est en contact direct avec le plateau ou le support [23]. La rugosité de cette surface dépend de la méthode de découpe de la pièce pour la désolidariser du plateau de fabrication. La surface supérieure est la dernière couche de fabrication [23]. Elle se caractérise par la présence des derniers cordons du procédé. Dans ce cas, la rugosité de surface dépend fortement des paramètres d'impression [33].

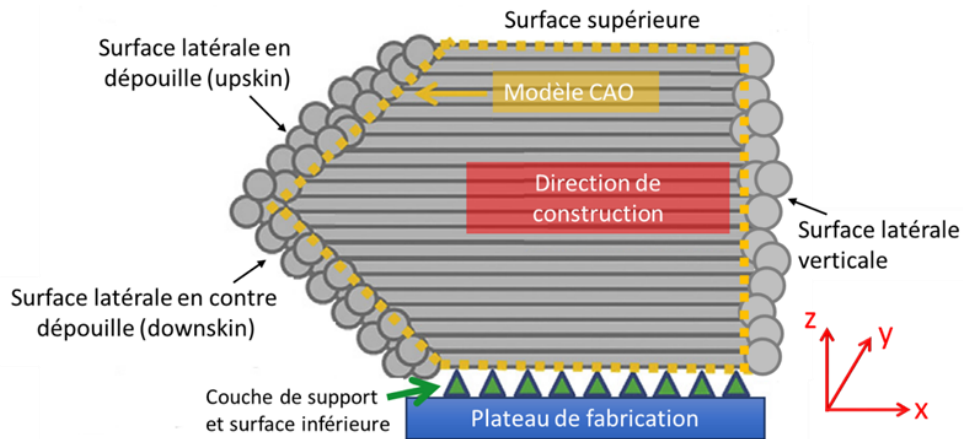


Figure 1.17 – Les différents types de surface en LPBF adapté de [23]

Le second groupe comprend les surfaces dites latérales. Ces surfaces sont toujours en contact avec le lit de poudre lors de la fabrication [23]. Elles sont plus rugueuses en raison de la superposition de couches pendant le procédé de construction, ainsi que de la présence de particules de poudre non fondues ou partiellement fondues attachées [27]. Les surfaces latérales sont verticales ou inclinées. Les surfaces inclinées peuvent être catégorisées en surfaces de dépouille (upskin) et de contre dépouille (downskin).

En complément, les surfaces peuvent être classées en fonction de leur accessibilité pour un éventuel post-traitement : accessibles, difficilement ou non accessibles (par exemple canaux internes complexes) (Figure 1.18) [21].

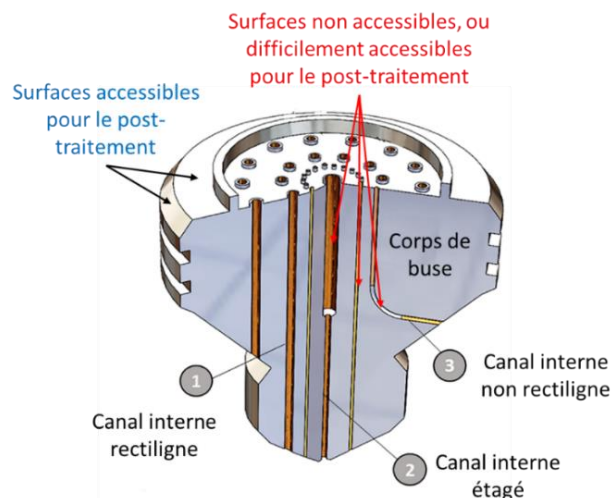


Figure 1.18 – injecteur de fusée et surfaces accessibles et difficilement voire non accessibles pour le post-traitement (adapté de [21])

### 1.4.2. Facteurs affectant potentiellement l'état de surface en LPBF

La Figure 1.19 schématise les processus de formation des volumes et surfaces en LPBF : plusieurs facteurs liés au procédé vont générer des phénomènes physiques plus ou moins voulus.

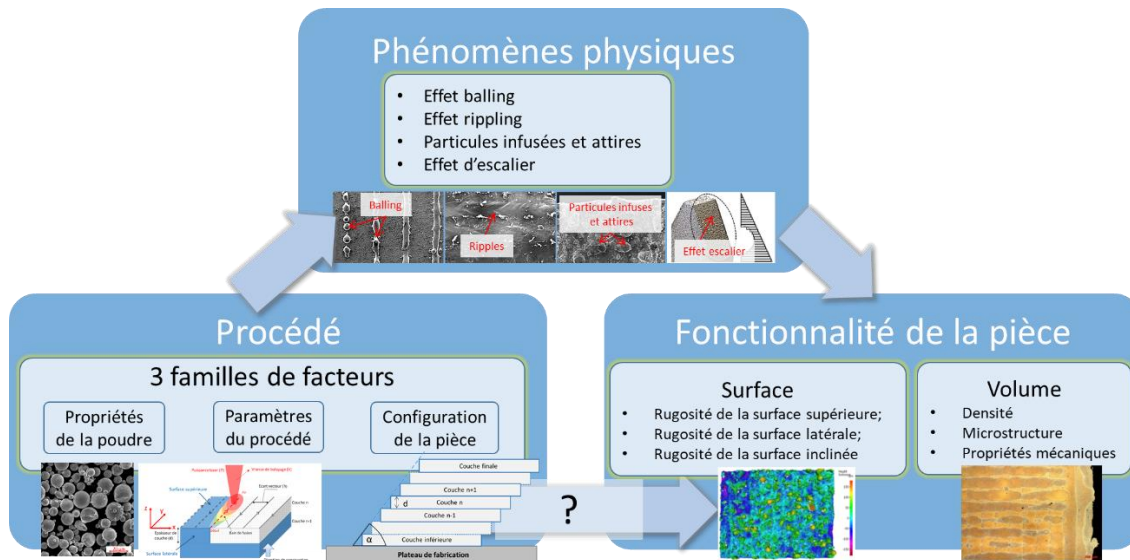


Figure 1.19 – Relation entre procédé, phénomènes physiques et fonctionnalité de la pièce

Ces mêmes phénomènes influenceront la fonctionnalité finale de la pièce produite par l'intermédiaire des surfaces et volumes créés [34].

Les facteurs de procédé peuvent être classés en trois grandes familles:

- Facteurs liés aux propriétés des poudres utilisées (section 1.4.2.1)
- Paramètres du procédé LPBF (section 1.4.2.2)
- Facteurs liés à la configuration de la pièce à produire (section 1.4.2.3)

Un réglage incorrect de ces nombreux facteurs peut entraîner des phénomènes indésirables [35].

#### Effet balling

L'effet balling est un phénomène au cours duquel le métal en fusion forme des billes sphéroïdales au lieu de cordons homogènes [16]. Cela peut être dû à une mouillabilité insuffisante de la couche précédente combiné à une tension superficielle du bain de fusion [70]. L'effet balling empêche la formation de cordons continus. A la place une surface rugueuse en forme de perles est générée (Figure 1.20). Sur plusieurs couches, cet effet génère un dépôt non uniforme de matière induisant ainsi des porosités et une délamination éventuelle entre les couches. Cet effet est donc très préjudiciable à la performance des pièces produites [70]. Dans les cas extrêmes, le balling peut s'aggraver couches après couches et provoquer le blocage du système de mise en couche et ainsi stopper la production.

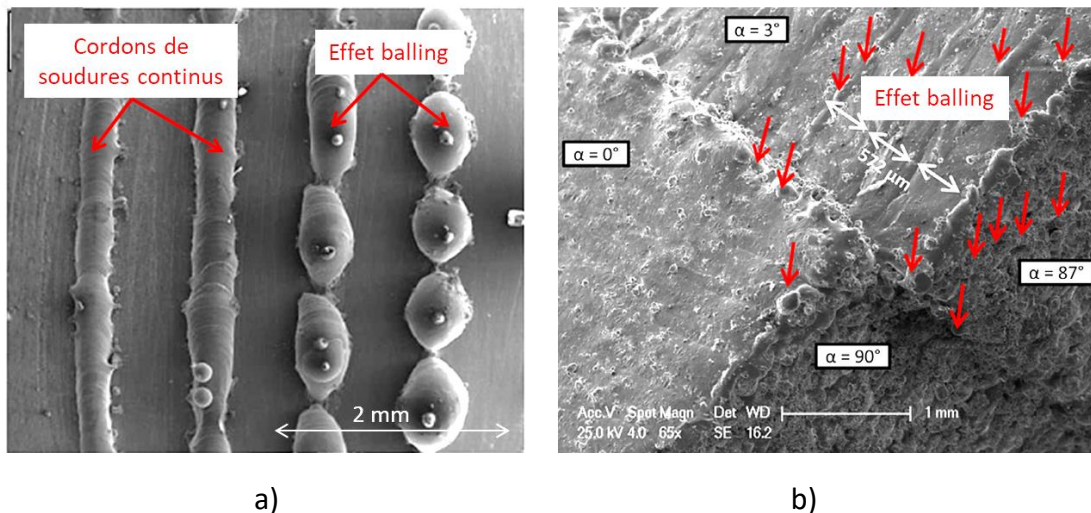


Figure 1.20 – Effet balling: a) différents cordons avec et sans effet balling; b) différentes surfaces (ou  $\alpha$  – angle d’inclinaison de surface) avec l’indication de l’effet balling adapté de [51-69]

Les études montrent que l’effet balling pourrait être réduit de manière significative en maintenant le niveau d’oxygène à 0.1% [70]. Il est également possible d’utiliser une combinaison de puissance laser élevée et de faible vitesse de balayage ou d’appliquer un balayage laser répétitif (la puissance laser et la vitesse de balayage sont présentées dans la section 1.4.2.2)

### Effet rippling

L’effet rippling se produit généralement en raison de l’inhomogénéité de la tension superficielle du bain fondu induite par l’effet Marangoni [71]. L’effet Marangoni est le phénomène de transport de matière liquide des régions de faible tension de surface (zone fondue) à des régions de forte tension de surface (front de solidification) (Figure 1.21). La valeur de cette tension dépend principalement des gradients de la température de surface entre la zone fondue et la zone de solidification. Ainsi, une contrainte de cisaillement surfacique est causée par l’évolution de la tension de surface [71].

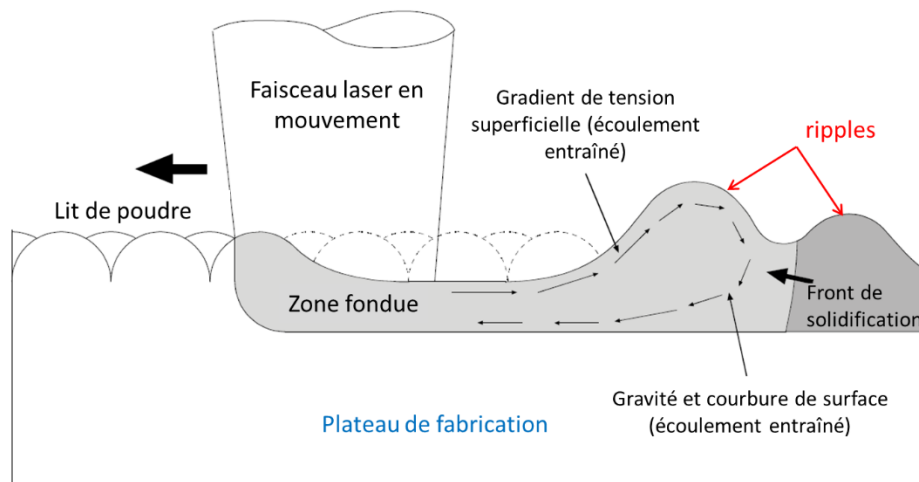


Figure 1.21 – Schéma de l’effet rippling [71]



Pour de faibles gradients de température (faibles taux de refroidissement), les forces de gravité et la courbure de la surface parviennent à contrebalancer la contrainte de cisaillement surfacique. La rugosité de la surface supérieure peut être dégradée par un effet rippling (Figure 1.22) [18,71].

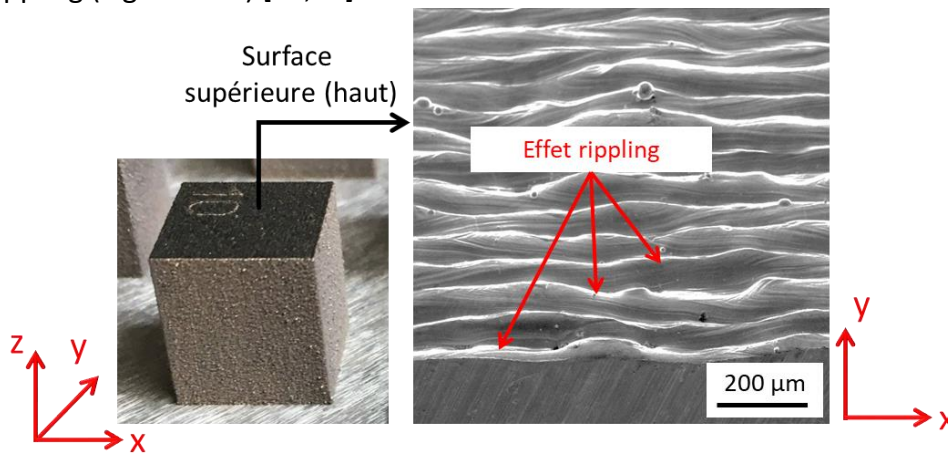


Figure 1.22 – Effet rippling sur la surface supérieure adapté de [14]

### Particules non fusionnées attachées à la surface

Un autre phénomène indésirable observé en fabrication additive est l'accrochage de particules non fusionnées sur les surfaces des pièces (Figure 1.23). Une température trop élevée du bain de fusion augmente la zone affectée par la chaleur, ce qui entraîne la fusion partielle des particules du lit de poudre qui sont alors attirées sur l'interface volume construit/lit de poudre.

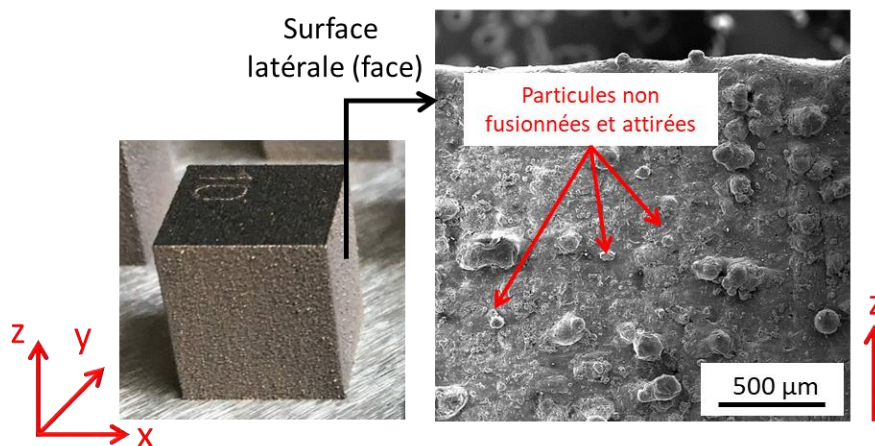


Figure 1.23 – Surface de fabrication additive avec des particules de poudre attachées

Il a été constaté que l'augmentation de l'écart vecteur (défini dans la section 1.4.2.2) réduit la température dans la zone affectée et diminue ainsi le nombre de particules attachées [14,35,43].

Une autre explication de la présence de particules attachées peut être le phénomène de dénudation de la poudre métallique qui se produit à proximité de la piste de fusion laser (Figure 1.24) [28]. La force motrice dominante pour dénuder la poudre près d'une piste de fusion est l'entraînement des particules qui collent à la surface par le flux de gaz

environnant, en raison de l'effet Bernoulli induit par le centre de la piste de fusion qui se vaporise.

La dynamique du processus de dénudation dépend de la géométrie du bain de fusion, du flux de vapeurs métalliques et de la pression du gaz environnant [28].

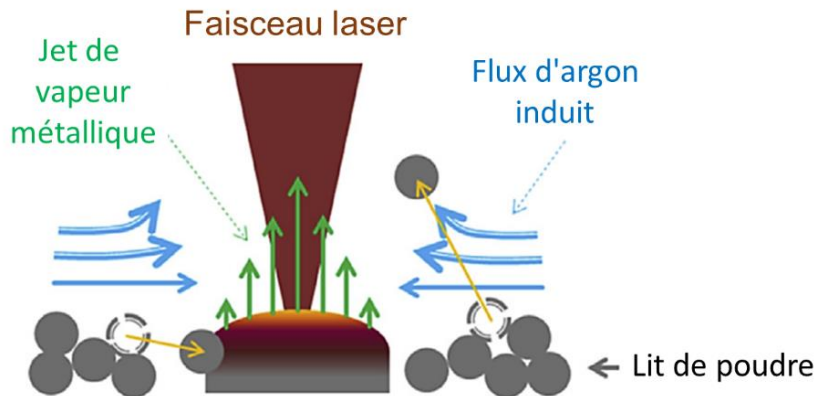


Figure 1.24 – Phénomène de dénudation

### L'effet d'escalier

L'effet d'escalier est une limitation pour toutes les techniques de fabrication par couches. Celui-ci apparaît dès lors que des pièces avec des surfaces inclinées ou courbes sont produites (Figure 1.25). Les surfaces produites ne correspondent alors pas au contour de la pièce désirée (Figure 1.26) [14,35,77]. En conséquence, des marches (gaps) se forment sur les côtés de l'objet. Normalement, la largeur de marche dépend de l'épaisseur de la couche (section 1.4.2.2) ainsi que de l'angle d'inclinaison (section 1.4.2.3). Lorsque l'angle d'inclinaison est réduit ou que l'épaisseur de la couche est augmentée, l'effet d'escalier devient plus prononcé [65].

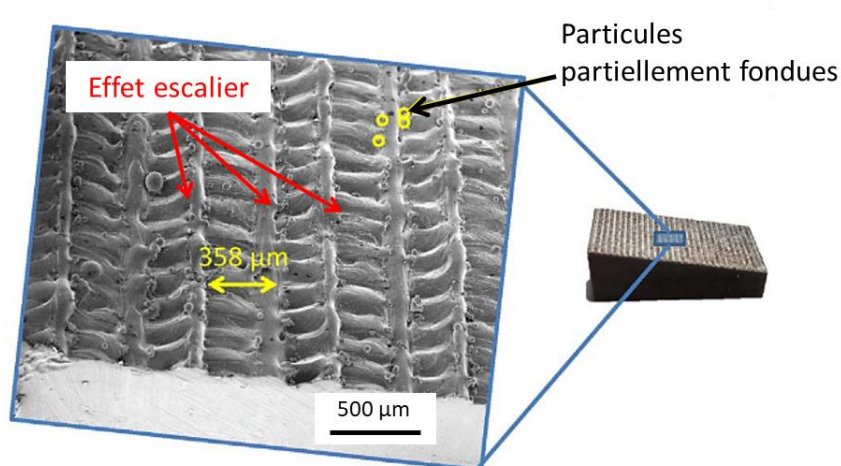


Figure 1.25 – Image MEB d'une surface avec une inclinaison de  $10^\circ$  [14]



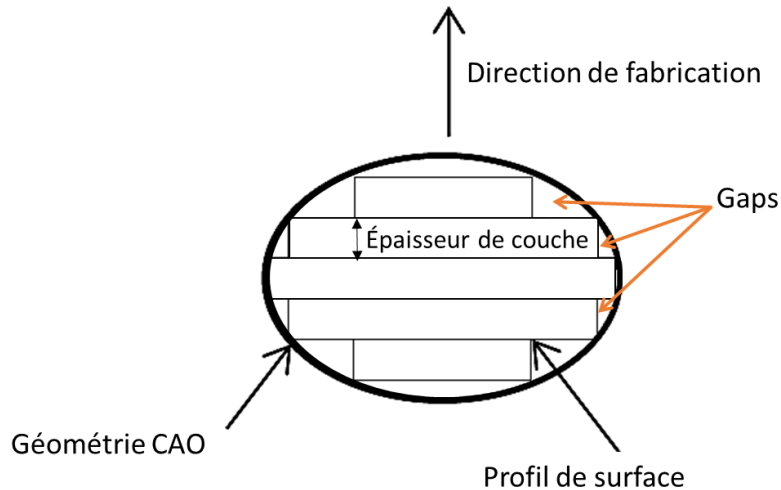


Figure 1.26 – Schéma de l'effet d'escalier pour une sphère [35,77]

Ainsi, pour obtenir la qualité de surface souhaitée, il est nécessaire de mieux comprendre le rôle de ces différents phénomènes engendrés lors du procédé LPBF. Ils devraient donc être étudiés plus en détail.

#### 1.4.2.1. Propriétés de la poudre

Il est évident que la poudre est un élément de base dans la fusion laser. Par conséquent, l'interaction laser-matériau et le choix des paramètres du procédé dépendent largement des propriétés de la poudre utilisée notamment de sa morphologie, de sa granulométrie et de ses propriétés physiques et chimiques [15,38,50].

##### Production des poudres: la forme des particules

Les poudres métalliques sont très rarement constituées de particules détachées, de forme géométrique simple et sans agglomérats. Selon la méthode de fabrication de poudre, la forme des particules peut varier d'une sphère idéale aux aiguilles, lamelles et dendrites [51].

En général, les poudres commerciales pour le procédé LPBF sont élaborées par atomisation au gaz. Cette méthode est moins coûteuse que l'atomisation au plasma et présente en même temps une sphéricité des particules plus élevée par rapport à l'atomisation au l'eau (Figure 1.27). En outre, l'atomisation au gaz permet d'obtenir une poudre non oxydée. C'est un avantage pour les poudres hautement réactives (par exemple la poudre d'aluminium). La présence d'oxyde à la surface des particules pose des défis supplémentaires pour la fusion laser du lit de poudre, notamment il provoque l'effet de balling (les surfaces oxydées réduisent la mouillabilité du cordon) [51].

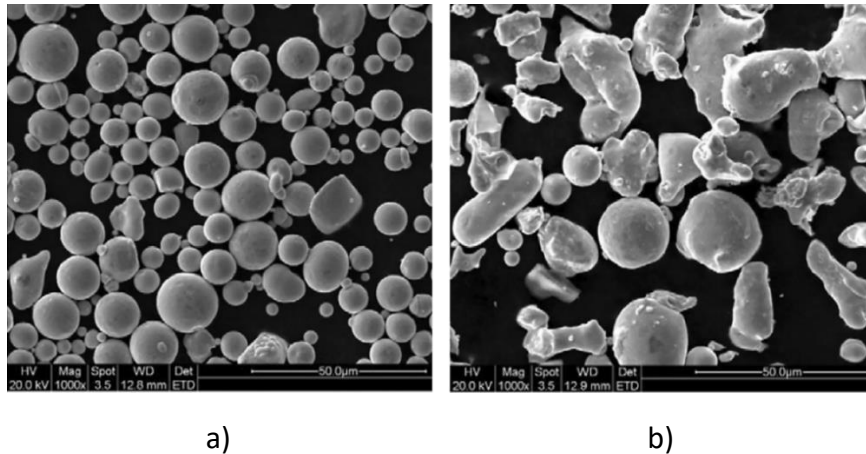


Figure 1.27 – Image MEB des poudres métalliques élaborées par: a) atomisation au gaz; b) atomisation à l'eau [51]

De nombreux travaux soulignent les avantages de l'utilisation de poudre à particules sphériques dans la fabrication laser [15,38,51]. Il a été constaté que les particules sphériques forment un lit de poudre dense, continue et homogène. Ceci est attribué à la bonne coulabilité de particules sphériques qui facilite le transport de la poudre vers la zone de fusion. De plus, le lit de poudre à particules sphériques a une meilleure conductivité thermique par rapport au lit de poudre à particules irrégulier [15]. Finalement, tout cela augmente la qualité des pièces fusionnées (rugosité, densité, etc.) [38].

#### Granulométrie: répartition des tailles

La poudre est caractérisée par sa granulométrie, c'est-à-dire la répartition statistique de la taille des grains. [51]. La composition granulométrique des poudres couramment utilisées en procédé de fusion laser a une distribution Gaussienne (volume représentant les grains ayant une diamètre donné) [52]. En général, la répartition des tailles est définie par trois valeurs : D90, D50, D10. Par exemple, selon la Figure 1.28, D10 = 20 µm signifie que 10% des particules sont inférieures à cette valeur, D50 = 45 µm indique que 50% de la poudre est inférieure à 45 µm et D90 = 60 µm indique que 90% des particules sont inférieures à 60 µm [51].

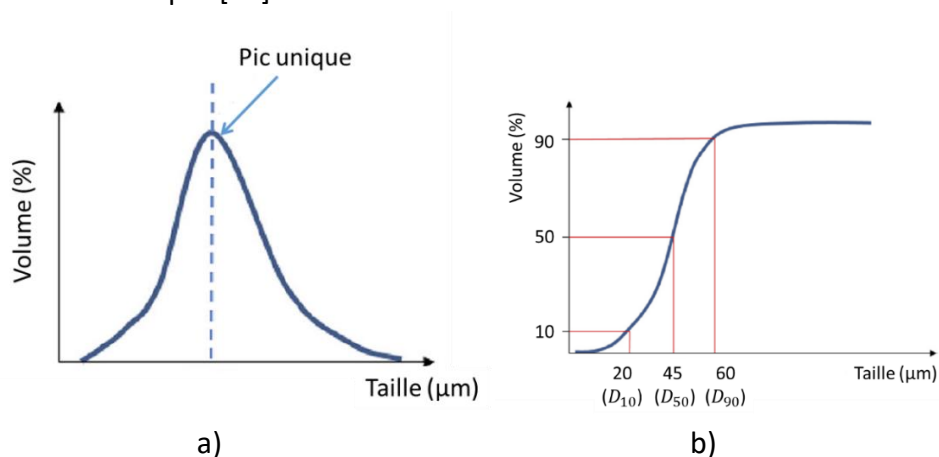


Figure 1.28 – Exemples de distribution de taille de poudre: a) Gaussienne; b) taille cumulative [51]

Certains travaux indiquent que pour assurer une bonne densité du lit de poudre, il est important d'utiliser des mélanges avec différentes tailles de particules [51,53]. Ils signalent également que l'utilisation d'une distribution granulométrique plus fine peut réduire la rugosité de la surface latérale (minimiser l'effet escalier) [53]. Comme les particules de plus petit diamètre permettent de choisir une épaisseur de couche plus faible (section 1.4.2.2). Les poudres à granulométrie fine sont également facilement fondues par laser et forment un bain de fusion lisse [54].

### **Propriétés physiques de la poudre**

#### **Coulabilité**

La coulabilité d'une poudre est un paramètre important dans la mise en couche. Une bonne coulabilité permet de créer une couche de poudre homogène d'épaisseur constante. Cela assure une absorption uniforme du faisceau laser dans la zone de fusion.

L'aptitude à l'écoulement d'une poudre dépend fortement de sa morphologie et de sa granulométrie. Par exemple, les poudres fines ayant un rapport surface / masse élevé ont tendance à être plus affectées par la force d'adhésion. Les grosses particules, en revanche, sont plus affectées par les forces gravitationnelles [53].

De plus, la coulabilité dépend du matériau. Les poudres d'alliage d'aluminium ont généralement une faible coulabilité [36]. Cela peut être influencé par deux facteurs [54]. Premièrement, les particules de poudre d'aluminium sont moins sphériques que les autres métaux (par exemple Ti) [55]. Pendant le procédé d'atomisation (même dans une atmosphère inerte), des oxydes peuvent se former à la surface de la poudre d'aluminium [55]. Ces oxydes limitent les forces de tension superficielle qui sphéroïdisent la particule fondue [56]. De plus, la poudre d'aluminium a une forte adhésion (décrite par les forces de Van der Waals), qui domine la masse des particules [52].

En outre, les exigences de coulabilité d'une poudre sont liées au type de machine de fusion laser utilisée. La poudre peut être déposée sur le plateau de fabrication par racleur, par rouleau ou par trémie.

La coulabilité d'une poudre peut être mesurée à l'aide des méthodes suivantes:

- Hall Flowmeter (ISO 4490:2008). Il mesure le temps d'écoulement de la poudre à travers un entonnoir normé;
- Rhéomètre à poudre. Il est utilisé pour mesurer l'angle interne de frottement et l'adhésion de la poudre.

#### **Conductivité thermique et réflectivité**

La conductivité thermique est une mesure de la dissipation de la chaleur lors de la fusion laser [15]. Si la poudre a une conductivité thermique élevée (comme l'aluminium), une énergie laser plus élevée sera nécessaire pour la faire fondre car la chaleur sera dissipée [37].

Une énergie laser élevée est également nécessaire pour les matériaux à haute réflectivité [56]. Ces matériaux ont une faible absorption et sont difficiles à manipuler [35]. D'autre part, il existe une différence significative de capacité d'absorption entre la

poudre et le matériau solide (précédemment fondu). Par conséquent, il existe un gradient de température important lors du chevauchement des cordons [37]. Le gradient de température du bain fondu contrôle l'écoulement convectif (effet Marangoni), qui peut induire l'effet rippling [36].

La réflectivité du lit de poudre peut être diminuée en ajoutant un matériau ayant de bonnes propriétés d'absorption. Par exemple, la présence de silicium dans un alliage d'aluminium réduit la réflectivité de ce dernier [37]. Cela rendra également la fabrication laser plus efficace d'un point de vue énergétique.

En résumé, la poudre d'aluminium a une conductivité thermique et une réflectivité élevées. Il faut donc tenir compte du fait que son traitement nécessite une énergie spécifique et une puissance laser élevées par rapport à d'autres matériaux. Il est également préférable d'utiliser des alliages d'aluminium avec des éléments chimiques qui ont une capacité d'absorption élevée.

### **Propriétés chimiques**

#### **Réactivité**

La poudre d'alliage d'aluminium est très réactive et forme des oxydes stables sur ses surfaces [36]. La formation d'une couche d'oxyde modifie la stabilité du cordon de fusion pendant le balayage laser. Le cordon devient sensible à divers phénomènes physiques tels que l'effet balling [56].

Afin de rendre le procédé d'oxydation inactif ou de le ralentir, il est nécessaire de:

- Traiter les alliages d'aluminium dans une atmosphère protectrice grâce à un gaz inerte (tel que l'argon, le néon ou l'azote).
- Utiliser des éléments d'alliage qui vont décomposer le film d'oxyde.
- Déterminer les paramètres optimaux du procédé de fabrication.

De plus, en raison de leur grande réactivité, les poudres d'aluminium sont fortement contaminées. Cette contamination est favorisée par l'humidité, la présence de matière organique et de gaz actifs dans l'environnement [36]. Les contaminants empêchent une mise en couche stable, perturbent la mouillabilité entre les particules dans les couches (favorisent l'effet balling) et dégradent donc la qualité des produits finaux [56]. Dans la littérature, il est recommandé de nettoyer la poudre en faisant un étuvage. Li et al. [92] ont étudié la composition chimique de la surface des particules d'alliage Al-12Si avant et après un étuvage à 100 °C pendant 1 h. Il a été constaté que l'étuvage à basse température (100°C) permet d'éliminer l'humidité de la surface de la poudre et, par conséquent, d'améliorer la densité de la pièce finale. Ainsi, les échantillons fabriqués à partir de la poudre étuvée ont une densité relative supérieure de 1 à 3 % à celle des échantillons fabriqués à partir de la poudre non étuvée [36].

#### **Composition**

Les alliages d'aluminium sont généralement difficiles à fusionner par laser. Cependant ils sont très intéressants en fabrication additive [17,37,40,47,54] et en particulier les alliages du groupe Al-Si (tels que AlSi10Mg, AlSi12, A357 et A356). Parmi eux, l'alliage le plus étudié est l'AlSi10Mg. Le succès de cet alliage est principalement dû à sa teneur en

silicium Si [37]. En effet cet élément chimique a une faible solubilité dans l'aluminium. Il reste donc sous forme de particules pures qui se caractérisent par une absorption laser élevée [17]. De plus, le silicium réduit les risques de fissuration à chaud [37]. En effet, sa présence diminue le coefficient de dilatation thermique et réduit donc le retrait lors de la solidification rapide du matériau. Les risques de fissuration sont ainsi diminués et l'intégrité structurelle du composant est améliorée [57].

### 1.4.2.2. Paramètres du procédé LPBF

Au cours de l'interaction laser-matière dans le procédé LPBF, le lit de poudre doit absorber une quantité d'énergie suffisante pour atteindre son point de fusion et ainsi former un bain de fusion [58]. La géométrie et la stabilité du bain de fusion sont extrêmement sensibles aux paramètres du procédé. Il existe un certain nombre de paramètres d'entrée qui peuvent être contrôlés et modifiés pour obtenir un bain fondu homogène [59]. Ces paramètres de base (dits primaires dans les prochains chapitres) sont décrits ci-dessous (voir Figure 1.29).

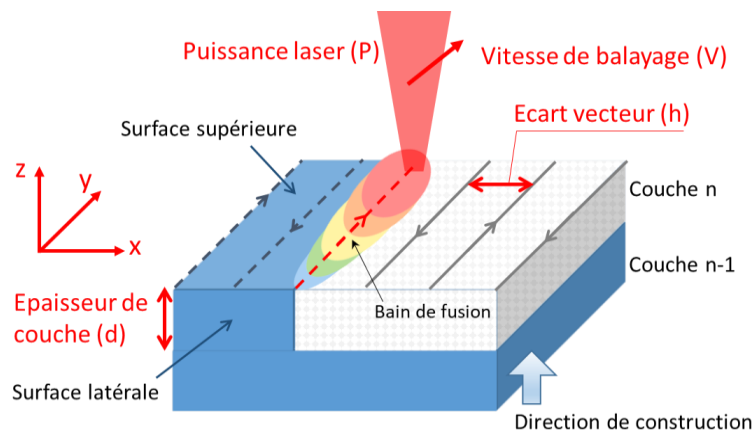


Figure 1.29 – Paramètres de base ou primaires du procédé LPBF

#### Puissance laser $P$ (en $W$ )

La puissance du laser ( $P$  en  $W$ ) contrôle la quantité d'énergie par unité de temps que le faisceau laser délivre au matériau [17]. La puissance dépend en grande partie du type de matériau traité [57]. Par exemple, les polymères peuvent être traités à 5  $W$ , tandis que les céramiques peuvent nécessiter 500  $W$  [61]. De plus, les matériaux à haute réflectivité et conductivité nécessitent plus d'énergie laser. En effet l'énergie laser est mal absorbée et se dissipe rapidement [15].

Le choix de la puissance est également influencé par d'autres paramètres de procédé. Par exemple, à puissance laser égale mais à un diamètre de faisceau plus petit, une densité d'énergie plus élevée sera obtenue [17].

#### Vitesse de balayage $V$ (en $mm/s$ )

La vitesse de balayage ( $V$  en  $mm/s$ ) correspond à la vitesse de fusion du laser. Le choix de la vitesse de balayage dépend du temps d'exposition nécessaire du laser sur la poudre pour assurer un transfert d'énergie suffisant pour la fusion [61]. Si ce temps d'exposition est trop faible, cela entraînera des manques de fusion locaux et provoquera

divers phénomènes physiques [15]. D'autre part, une vitesse de balayage trop faible entraînera un transfert d'énergie trop important pour la poudre et, par conséquent, un risque élevé d'évaporation des éléments d'alliage [15]. Le choix de la vitesse de balayage est étroitement lié à la puissance laser utilisée et détermine la densité d'énergie linéique (présentée ci-dessous).

### Ecart vecteur h (en $\mu\text{m}$ )

Un écart vecteur ( $h$  en  $\mu\text{m}$ ) est la distance entre deux passages successifs du laser. Il est mesuré par la distance entre le centre d'un cordon solidifié et le centre du suivant. L'écart vecteur affecte la forme du chevauchement entre les bords elliptiques des cordons et affecte donc la rugosité de la surface [19].

Il existe une relation idéale simplifiée entre l'écart vecteur ( $h$ ,  $\mu\text{m}$ ) et la rugosité de la surface ( $Ra$ ,  $\mu\text{m}$ ) (Figure 1.30) [43], avec  $\theta$  – angle défini par la forme de l'extrémité du cordon :

$$Ra = \frac{h}{2} \cdot \tan\theta \quad (1)$$

L'équation (1) montre que la rugosité diminue lorsque l'écart vecteur diminue. Cependant, en pratique, plus de particules peuvent rester attachées à la surface si l'écart vecteur est trop faible. En effet, une distance trop faible entre deux passages successifs, implique au matériau de recevoir plus d'énergie. La température du bain de fusion et de la surface solide sera alors plus élevée sur une plus grande zone. Cela aura donc tendance à attacher plus de poudres partiellement fondues à l'interface volume construit/lit de poudre. Ceci entraînera donc une plus grande rugosité de surface [43].

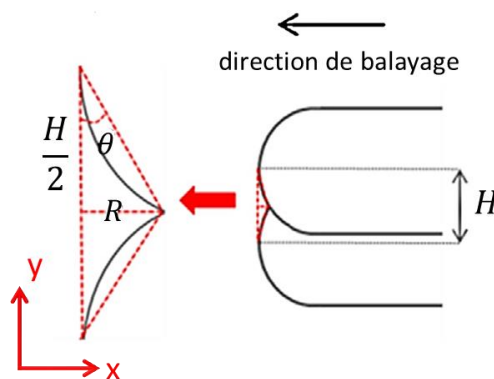


Figure 1.30 – Schéma de la zone de recouvrement entre deux cordons adjacents et la relation géométrique établie entre la rugosité  $R$  verticale de la surface et l'écart vecteur  $H$  [43]

### Épaisseur de couche $d$ (en $\mu\text{m}$ )

L'épaisseur de couche ( $d$  en  $\mu\text{m}$ ) détermine la hauteur de chaque ajout de matière dans les procédés de fabrication additive [63]. Elle est fixée en modifiant la hauteur de la plateforme de construction [65]. L'épaisseur de la couche influe directement sur la rugosité de la pièce finale, surtout dans le cas de surfaces inclinées (effet escalier) [14]. Certains travaux montrent que la rugosité de surface d'une couche plus fine ( $20 \mu\text{m}$ ) tend à être meilleure que celle d'une couche plus épaisse ( $40 \mu\text{m}$ ) [43]. De plus, une

épaisseur de couche plus faible nécessite des particules plus fines dans le lit de poudre et contribue à un procédé de fusion plus dense [53]. Cependant, cela augmente le temps de production et peut augmenter le niveau des contraintes résiduelles [53,93].

### Densités d'énergie $E_L$ et $E_V$

La vitesse de balayage  $V$  et la puissance du laser  $P$  vont influencer un paramètre intermédiaire appelé densité d'énergie linéique ( $E_L, J/mm$ ) définie par l'équation suivante (eq. (2)).

$$E_L = \frac{P}{V} \quad (2)$$

Cette relation est souvent utilisée comme paramètre pour l'optimisation de la forme des cordons [61]. En effet la densité d'énergie linéique détermine la taille, la forme et l'intégrité des cordons fusionnés [62].

Il existe également une méthode volumique pour calculer la densité d'énergie. Cette méthode est la plus couramment utilisée dans la littérature et sert à optimiser les volumes construits [15,19,60]. La densité d'énergie volumique ( $E_V, J/mm^3$ ) est définie par la relation suivante:

$$E_V = \frac{E_L}{h \cdot d} = \frac{P}{V \cdot h \cdot d} \quad (3)$$

Avec  $h$  l'écart vecteur exprimé en mm et  $d$  l'épaisseur de couche exprimé en mm.

#### 1.4.2.3. Configuration de la pièce à produire

##### L'angle d'inclinaison

Comme mentionné précédemment, l'angle d'inclinaison a une forte influence sur la topographie de la surface FA. En effet, l'angle d'inclinaison ainsi que l'épaisseur de la couche sont liés à l'effet d'escalier [14]. En général, la rugosité des surfaces latérales diminue avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison, par exemple, de  $30^\circ$  à  $60^\circ$  (Figure 1.31) [43]. Ainsi, à un angle de  $90^\circ$  (surface verticale) ou  $0^\circ$  (surface horizontale), l'effet escalier disparaît [14,88].

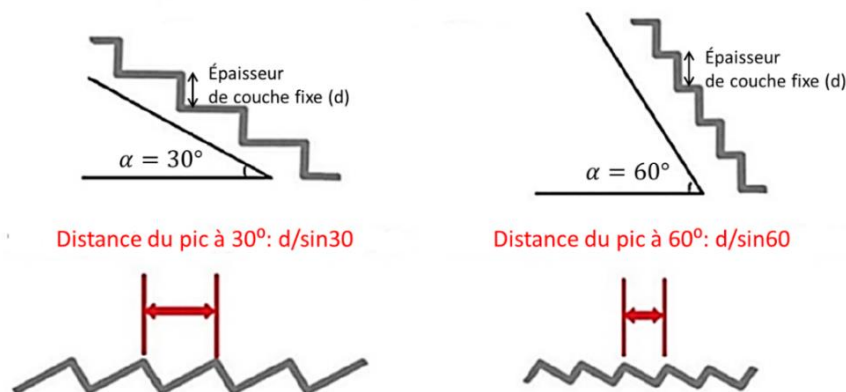


Figure 1.31 – Schéma illustrant la réduction de l'effet escalier lorsque l'angle d'inclinaison est augmenté de  $30^\circ$  à  $60^\circ$  [66].

### L'orientation sur le plateau

L'orientation de la pièce sur un plateau de fabrication est un facteur important. Elle affecte à la fois la rugosité et la précision des pièces construites, ainsi que la complexité des supports et la durée de fabrication [67].

Divers critères d'orientation des pièces sont pris en compte dans les études pour améliorer la qualité des surfaces produites [67-69]. Par exemple, la Figure 1.32 montre deux orientations différentes du modèle 3D. La première orientation a une direction de construction #1 et la deuxième a une direction de construction #2. Dans le premier cas, toutes les surfaces du modèle sont parallèles ou perpendiculaires au plateau de production et ne comportent pas de supports. Dans le second cas, la surface cylindrique du modèle est disposée horizontalement et présente une structure de support provoquant un effet escalier. Cette orientation dégrade la topographie de surface et nécessite un post-traitement.

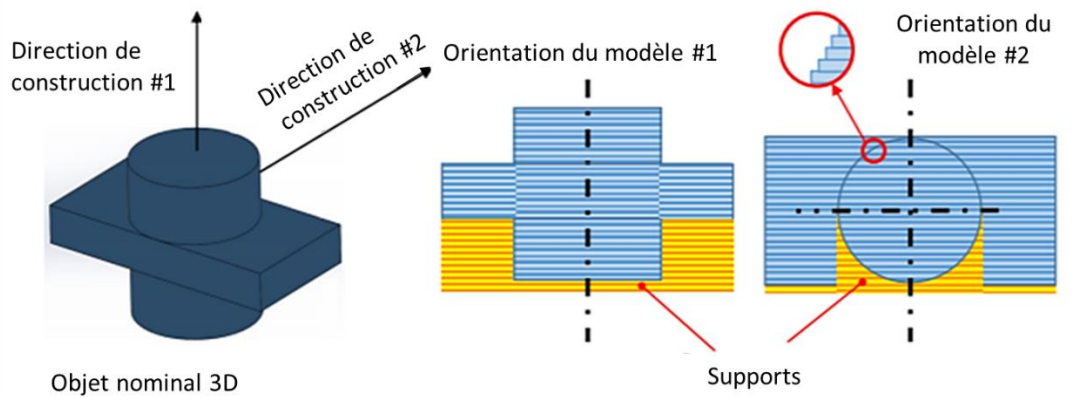


Figure 1.32 – Effet escalier et supports: influence de la configuration de construction sur la rugosité de surface [71]

Ainsi les principaux critères d'orientation sont les suivants:

- Utiliser un nombre minimum de supports complexes qui dégradent la qualité de la surface et nécessitent un post-traitement;
- Placer les surfaces importantes parallèlement ou perpendiculairement au plateau de fabrication en évitant l'effet d'escalier.

#### **1.4.2.4. Conclusion**

Le Tableau 1.6 donne un bref aperçu de la littérature pour toutes les sous-sections précédentes. Les deux colonnes à gauche du tableau montrent les facteurs du procédé et les phénomènes physiques pouvant être engendrés. La partie droite indique les effets potentiels de ces phénomènes sur la rugosité et la densité des surfaces supérieure et latérale. Les références sont classées selon leurs conclusions : « Oui » si l'article mentionne un lien avec des phénomènes physiques, « non mentionné » sinon.



Tableau 1.6 – Revue des facteurs du procédé LPBF, leur influence sur des phénomènes physiques engendrés et les conséquences potentielles sur la fonctionnalité des pièces

	Facteurs	Phénomènes physiques générés	Effet potentiel sur :			Réf	
			la rugosité latérale	la rugosité supérieure	la densité		
Propriétés de la poudre AISI10MG	Absorptivité Réflectivité Oxydation	Effet balling	Oui	Oui	Non mentionné	[35]	
			Non mentionné	Non mentionné	Oui	[36] [37] [38] [92]	
			Non mentionné	Oui	Non mentionné	[71]	
			Oui	Oui	Oui	[50] [51]	
	Conductivité thermique Taux de dissipation de la chaleur	Effet rippling	Non mentionné	Oui	Non mentionné	[18] [71]	
	Paramètres de procédé	Densité d'énergie linéaire P/V	Effet balling	Non mentionné	Oui	Oui	[38] [39] [40] [41] [42]
Oui				Oui	Non mentionné	[18] [34] [43] [44]	
Particules infusées et attirées			Oui	Non mentionné	Non mentionné	[45] [41]	
			Non mentionné	Non mentionné	Oui	[46] [36]	
			Non mentionné	Oui	Non mentionné	[47] [71]	
Épaisseur de la couche			Effet escalier	Oui	Non mentionné	Non mentionné	[43] [48] [49]
Ecart vecteur			Particules attirées	Oui	Oui	Non mentionné	[34]
		Oui		Non mentionné	Non mentionné	[43] [62]	
		Non mentionné		Non mentionné	Oui	[40]	

Pièce	Orientation de construction	Effet escalier	Oui	Non mentionné	Non mentionné	[43]
						[14]
						[35]
						[48]
						[69]
						[79]
						[95]
[96]						

Ce tableau montre que la densité de la pièce et la rugosité de surface ont rarement été étudiées simultanément. De plus, lorsqu'elle est étudiée, la génération de surface latérale est principalement comprise par l'effet escalier (épaisseur de couche, écart vecteur et orientation de construction).

### 1.4.3. Analyse des topographies de surface issues de Fabrication Additive

Cette section traite des recherches qui analysent la topographie des surfaces produites par la FA. L'analyse topographique comprend les étapes classiques : l'acquisition de la topographie de surface et son traitement (prétraitement et post-traitement). Cependant, les surfaces FA présentent des caractéristiques topographiques particulières (l'inhomogénéité, présence de particules attachées, etc.) qui les distinguent des surfaces obtenues par la méthode traditionnelle (soustractive) [14]. Il est donc nécessaire d'aborder correctement le choix de la méthode d'analyse [27].

#### 1.4.3.1. Acquisition des surfaces issues de Fabrication Additive

Selon la littérature [14, 27], la mesure de profil 2D par les instruments à stylet est plus souvent choisie comme le moyen d'acquisition de topographie de surface FA (40 % de la littérature examinée). Cette méthode de mesure est la plus courante dans l'industrie en raison de son faible coût [27]. Cependant, les mesures basées sur le profil du stylet ne donnent pas toujours une description correcte de la topographie des surfaces FA. Généralement ces surfaces présentent de grandes différences de hauteur et de nombreuses particules incrustées [14, 27]. Les principales raisons contribuant à des mesures incorrectes sont donc présentées ci-dessous [14]:

- Le stylet se détériore avec de telles surfaces.
- Adhésion des particules non fondues sur la pointe.
- Un filtrage mécanique dû au rayon de la pointe sur le lit de particules partiellement fondues.

Ensuite, la microscopie à variation focale et la microscopie confocale (11% de la littérature étudiée) sont également utilisés [14,27]. Les moyens optiques capables d'enregistrer des informations 3D sont plus adaptés à la mesure de la topographie des surfaces FA. Ils peuvent mesurer des surfaces sur une large gamme, car la taille des défauts résultant de la fabrication additive peut aller de quelques microns à plusieurs dizaines de microns. Cependant, ils doivent tenir compte des propriétés de réflexion du matériau à mesurer. Comme les propriétés réfléchissantes de surface FA peuvent différer considérablement de propriétés optiques d'une surface plane polie [27].

L'interférométrie à lumière blanche, est moins utilisée (7 % de la littérature examinée) car les surfaces FA très irrégulières ont des pentes locales très inclinées [27].

De même, étant donné la nature très irrégulière de la plupart des surfaces métalliques FA, les microscopes à force atomique (AFM) ont rarement été utilisés : limitations de la plage de mesure (verticale) et risque d'endommagement du stylet [27].

La plupart des chercheurs impliqués dans la caractérisation des surfaces FA ont utilisé un certain type d'imagerie 2D conventionnelle, principalement le MEB (11%) et la microscopie optique (7%) [14,27]. Faute de pouvoir fournir des informations quantitatives dans la direction verticale (hauteur), les techniques d'imagerie 2D ont une application limitée pour la mesure quantitative de la topographie des surfaces [27].

### 1.4.3.2. Traitement des topographies de surfaces issues de Fabrication Additive

#### Prétraitement

Comme il a été décrit précédemment (section 1.3), une fois que l'acquisition de surface a été effectuée, il existe des procédures standard pour leur prétraitement : suppression de forme, filtrage, etc.

Les paramètres de suppression de forme restent importants et sont applicables aux surfaces FA. Parmi les filtres, 90% des travaux utilisent le filtre gaussien avec une certaine longueur de coupure  $\lambda_C$  (cas de mesures de profils dits 2D) [27]. Cependant, dans le cas du filtrage, les longueurs de coupure standards ont été développées pour les procédés conventionnels (usinage). C'est pourquoi Triantafyllou et al. [97] ont étudié la possibilité d'utiliser des valeurs des filtres  $\lambda_C$  (profil 2D),  $S$  et  $L$  (surface 3D) standard pour les surfaces FA [27]. Les résultats obtenus ont montré que le filtre L (selon la norme ISO 25178-3, la longueur des côtés de la zone de mesure) ne devait pas dépasser 2.5 mm. Il suppose également qu'une longueur de coupure  $\lambda_C$  de 2.5 mm pour les mesures de profil (au lieu de 8 mm sur la base de la surface  $Ra$  selon la norme ISO 4288) sera suffisante pour fournir les données nécessaires pour caractériser les surfaces FA. Ce résultat est significatif car il réduit la longueur de mesure de profil requise par un facteur de plus de trois et la zone de mesure surfacique requise par un facteur de dix. Le résultat peut également permettre d'acquérir des mesures surfaciques sans avoir besoin de champs d'images assemblés [27].

#### Post-traitement

A ce jour, le paramètre de rugosité le plus couramment utilisé dans la littérature est le paramètre de profil  $Ra$  – l'écart moyen arithmétique. Le deuxième paramètre le plus utilisé parmi les paramètres de profil est  $Rq$ , l'écart moyen quadratique. D'autres paramètres de profil qui ont été utilisés pour caractériser la rugosité des surfaces FA :  $Rz$  (hauteur maximale du profil) et  $Rt$  (hauteur totale du profil).

Malgré l'utilisation prédominante des paramètres de profil (en particulier  $Ra$ ) dans l'analyse des surfaces FA, ils ne reflètent pas pleinement leurs caractéristiques [27]. Les paramètres de rugosité surfacique sont donc toujours de plus en plus acceptés.

En effet, les paramètres surfaciques présentent des avantages évidents par rapport aux paramètres de profil puisque la topographie de la surface est tridimensionnelle par nature. Par conséquent, toute analyse de profils bidimensionnels donnera une

description ambiguë ou incomplète de la surface réelle (Figure 1.33). Par exemple, une mesure de profil prise perpendiculairement à la direction d'une rayure peut produire la même trace qu'une mesure de profil prise sur un cratère.

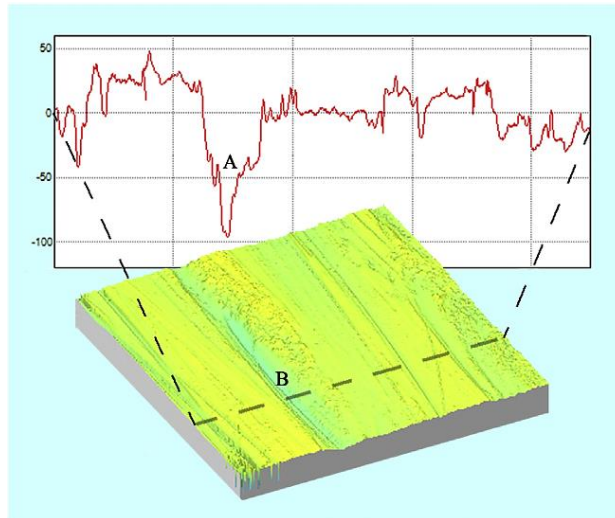


Figure 1.33 – Mesure de profil extraite d'une mesure surfacique. D'après la trace du profil, "A" pourrait être un cratère ou une rayure. D'après la mesure surfacique, le même emplacement "B" indique clairement une rayure [27]

$Sa$  fait partie des paramètres surfaciques le plus largement utilisé dans la littérature (90 % des références). Le paramètre surfacique  $Sa$  est l'équivalent du  $Ra$  pour les profils 2D. Il s'est donc avéré plus facile à adopter pour les utilisateurs dans les environnements où  $Ra$  était déjà utilisé.

Il existe de nombreux autres paramètres surfaciques qui décrivent les surfaces de différentes manières. Certaines études recommandent l'utilisation combinée d'écart moyen arithmétique ( $Ra$  ou  $Sa$ ), d'hauteur maximale ( $Rz$  ou  $Sz$ ), de facteur d'asymétrie ( $Rsk$  ou  $Ssk$ ) et de facteur d'aplatissement ( $Rku$  ou  $Sku$ ) pour caractériser les surfaces FA.

Par exemple, le paramètre  $Ssk$  (coefficient d'asymétrie), est un indicateur de la morphologie de la surface: une valeur positive indique que la surface contient principalement des saillies matérielles, tandis qu'une valeur négative indique que la surface est dominée par des vallées [14]. Par conséquent, les surfaces obtenues lors de la fabrication additive peuvent être identiques en termes de  $Sa$ , alors que morphologiquement, elles sont très différentes.

## 1.5. Modélisation de topographies générées en Fabrication Additive

La modélisation de la topographie de surface offre des avantages importants pour améliorer la qualité de la surface brute des composants FA. Elle permet de prédire la valeur de la rugosité de surface en fonction des paramètres d'entrée du procédé.

À ce jour, diverses méthodes mathématiques sont utilisées pour la modélisation des surfaces. La plupart des modèles de prédiction ont été développés pour la

stéréolithographie (SLA) et le dépôt de fil fondu (FDM) [77, 88-93]. Ils sont basés principalement sur la modélisation de l'effet escalier.

### Modèles basés sur l'effet escalier

Les modèles basés sur l'effet escalier peuvent prédire la rugosité des surfaces inclinées ou courbes (Figure 1.34 et Figure 1.35). L'épaisseur de la couche ( $t$  en  $\mu m$ ) et l'angle d'inclinaison ( $\alpha$  en  $^\circ$ ) (ou l'orientation de fabrication ( $\theta$  en  $^\circ$ )) sont les principaux paramètres d'entrée pour les modèles analytiques. La rugosité moyenne arithmétique de la surface ( $Ra$  en  $\mu m$ ) est le paramètre de sortie [77, 88-93].

Le premier modèle décrivant un profil d'escalier a été proposé par Reeves et Cobb en 1996 [88]. Ils ont supposé des plans idéaux pour les surfaces verticales et horizontales d'une couche. La rugosité moyenne  $Ra$  est ensuite calculée avec le profil constitué d'une série de triangles (Figure 1.34). Selon la définition de l'ISO (ISO 4287, 1997),  $Ra$  est exprimé comme suit :

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y - \bar{y}| dx = \frac{L_t}{4} \cos \alpha \quad (4)$$

Où:

$L$  – longueur de mesure;

$y$  – hauteur du profil;

$\bar{y}$  – hauteur moyenne du profil;

$\alpha$  – angle d'inclinaison

$L_t$  – épaisseur de la couche.

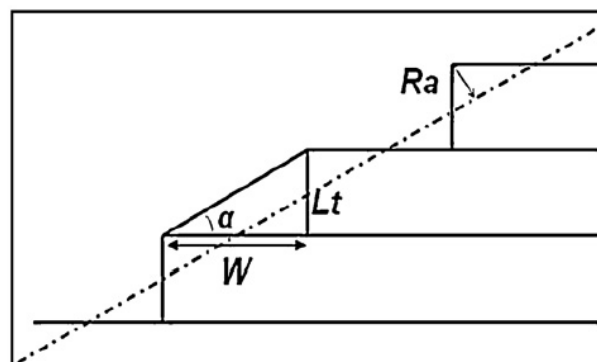


Figure 1.34 – Représentation schématique d'un profil d'escalier [79]

Initialement, ce modèle est appliqué pour prédire la rugosité de surface pour les pièces issues de SLA mais s'adapte à d'autres procédés FA [35,79]. Un inconvénient de ce modèle est l'incapacité de prédire la rugosité pour les surfaces horizontales et verticales. Ces surfaces sont idéalisées. Par conséquent, une valeur  $Ra$  de zéro leur est attribuée.

Le modèle analytique le plus accepté pour estimer la rugosité de surface pour le procédé FDM est développé par Pandey et al. [89-91]. Trois points principaux ont été identifiés sur la base de leurs observations :

- L'épaisseur de la couche et l'orientation de fabrication sont les deux variables les plus importantes qui affectent l'état de la surface (Figure 1.35);

- Les profils des bords d'une pièce multicouche sont paraboliques
- L'effet du rayon de courbure sur la rugosité de surface peut être considéré comme indépendant, car il varie dans les limites de 5% sur une large plage de valeurs de courbure.

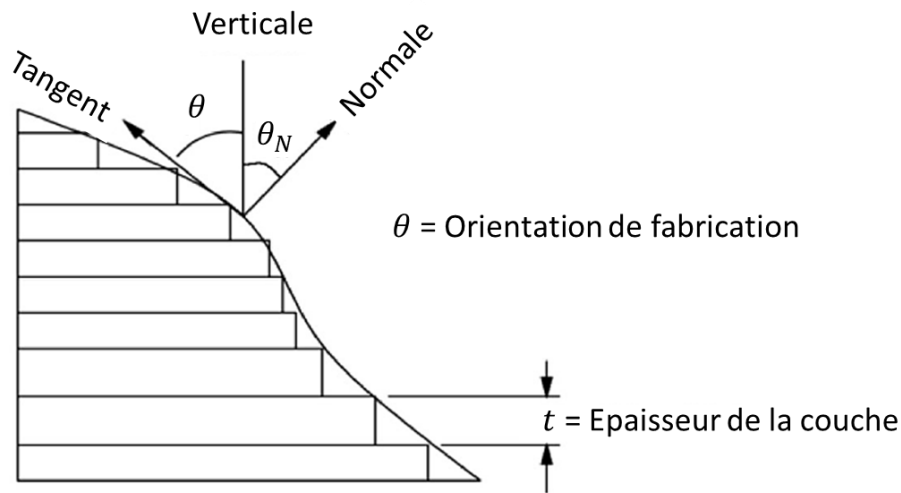


Figure 1.35 – Modèle de paramètres d'évaluation de la rugosité de surface pour le procédé FDM [92]

Ils ont proposé un modèle hybride pour prédire la rugosité des surfaces  $Ra$  en fonction de différents intervalles d'angles :

$$Ra = \begin{cases} (69.28 \sim 72.36) \frac{t}{\cos \theta}, & 0 \leq \theta \leq 70 \\ \frac{1}{20(90Ra_{70} - 70Ra_{90} + \theta(Ra_{90} - Ra_{70}))}, & 70 < \theta < 90 \\ 117.6 \times t, & \theta = 90 \\ Ra_{(\theta-90)}(1+w), & 90 < \theta \leq 180 \end{cases} \quad (5)$$

Où :

$t$  – épaisseur de couche (mm);

$\theta$  – orientation de fabrication ( $^\circ$ );

$Ra_{(\theta-90)}$  – équivalent de la rugosité pour l'orientation de construction ( $\theta - 90$ )

$w$  – Paramètre de réglage sans dimension pour les facettes prises en charge (choisi pour être 0,2 dans tous les systèmes FDM).

Ainsi, pour l'intervalle  $0 \leq \theta \leq 70$ , Ils utilisent un modèle semi-empirique (surfaces en dépouille). Elle se rapproche du profil de bord de la couche par une parabole avec une longueur de base de  $t/\cos\theta$  et une hauteur de 30 à 35 % de la longueur de base. Dans l'intervalle  $70 < \theta < 90$ , ils constatent que la forme du profil de surface change dans des conditions spécifiques. La rugosité de surface est donc calculée en supposant une variation linéaire entre  $Ra_{70}$  et  $Ra_{90}$ . Ensuite, la rugosité  $Ra$  pour une surface verticale,  $\theta = 90^\circ$  est idéalisée par un demi-cercle avec une longueur de base  $t$  et une hauteur de  $0,5t$ . Enfin, pour les surfaces orientées entre  $90^\circ$  et  $180^\circ$  (surfaces contre dépouille), l'application de structures de support est nécessaire. Par conséquent, un paramètre de réglage sans dimension pour les facettes prises en charge ( $w$ ) est utilisé.

Malgré cela, les modèles basés sur une description pure du profil d'escalier ne peuvent souvent pas prédire avec précision la rugosité de surface des pièces, en particulier pour le procédé PBF, car la rugosité de surface est également influencée par d'autres facteurs du procédé. Par exemple, pour les surfaces en dépouille, le transfert de chaleur se fait principalement à travers la couche pré-solidifiée (qui est également un matériau solide), tandis que pour les surfaces contre dépouille le transfert de chaleur se fait à travers les particules de poudre. Le phénomène de transfert de chaleur différent qui se produit pour les surfaces en dépouille et contre dépouille entraîne des différences de rugosité de surface en raison du nombre différent de particules attachées [43,89].

### Modèles basés sur l'effet escalier combiné à d'autres phénomènes

Quelques études sont disponibles sur la prédiction de la rugosité de surface des pièces LPBF en fonction de l'effet d'escalier et d'autres facteurs du procédé [35,78-79].

Une étude prend en compte la contribution des paramètres de procédé tels que la puissance du laser ( $P$  en  $W$ ), la vitesse du faisceau ( $V$  en  $mm/s$ ) et l'écart vecteur ( $h$  en  $\mu m$ ) à la rugosité des surfaces des pièces de frittage sélectif par laser (SLS) [94]. Le modèle empirique développé montre que dans le cas de surfaces en dépouille (Figure 1.36), l'orientation de fabrication ( $\theta$  en  $^\circ$ ) et l'épaisseur de la couche ( $t$  en  $\mu m$ ) sont toujours des paramètres importants pour prédire la rugosité de la surface  $Ra$ . L'influence des autres facteurs du procédé est négligeable (équation (6)).

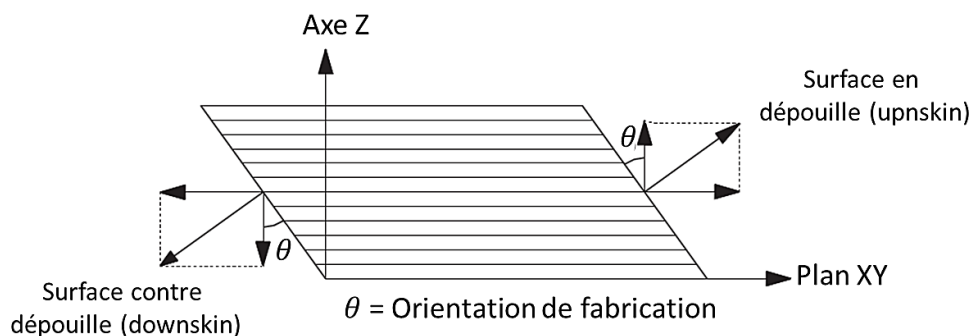


Figure 1.36 – Définition des surfaces en dépouille et contre dépouille en fonction du concept d'orientation de fabrication [94]

$$Ra_{en\ dépouille} = -2.04067 + 0.22\theta + 0.06722t - 0.001368\theta^2 \quad (6)$$

Où :

$t$  – épaisseur de couche (mm);

$\theta$  – orientation de fabrication ( $^\circ$ ).

En revanche, dans le cas des surfaces contre dépouille, la puissance du laser a également une influence importante sur la qualité des surfaces générées. En effet, lorsque la puissance du laser augmente, l'effet de filetage augmente dans un premier temps, ce qui entraîne une amélioration de l'état de surface. Cependant, lorsque la puissance du laser dépasse une certaine valeur, la pénétration du laser dans la couche de poudre augmente et entraîne une détérioration de l'état de surface (Figure 1.37) [94].

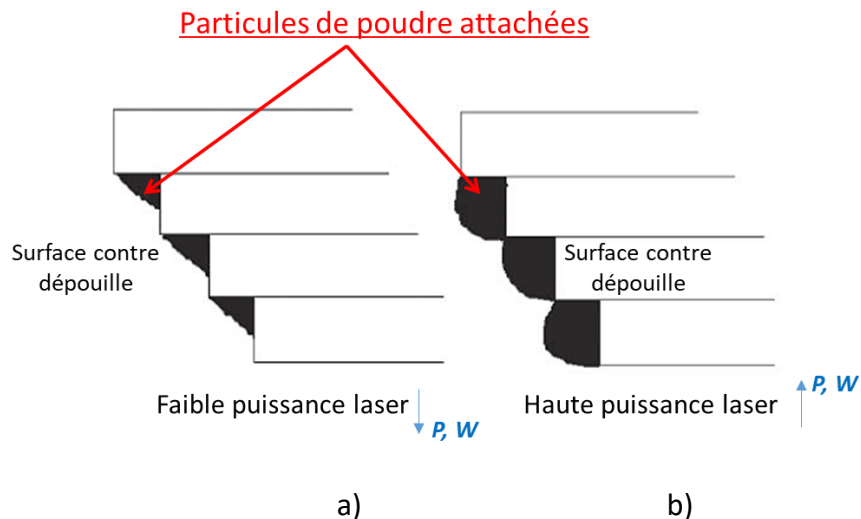


Figure 1.37 – Effet de filetage lors du frittage des couches (surfaces orientées vers le bas) : a) faible puissance laser; b) haute pénétration à puissance laser élevée [94]

L'équation pour déterminer la rugosité des surfaces en contre dépouille est ainsi présentée comme suit:

$$Ra_{\text{contre dépouille}} = 185 - 9.52P - 0.834\theta - 0.157t + 0.15P^2 - 0.00099\theta^2 + 0.0058\theta t \quad (7)$$

Où :

$P$  – puissance laser (W);

$t$  – épaisseur de couche (mm);

$\theta$  – orientation de fabrication ( $^{\circ}$ ).

Cela montre qu'il est important de prendre en compte l'effet escalier ainsi que le profil réel pour les technologies FA. Par ailleurs, il faut prêter attention à la présence de particules de poudre à la surface car cela permet de modéliser plus précisément la rugosité notamment pour les surfaces verticales et horizontales.

Strano et al. [79] ont donc présenté une méthode permettant de décrire l'effet des particules partiellement attachées sur la surface des pièces en acier inoxydable 316L. Les résultats ont montré un écart marqué par rapport au modèle original proposé par Reeves et Cobb (équation (4)), qui attribue une rugosité moyenne de zéro aux surfaces verticales [35]. La méthode tient compte de la présence de particules sur la surface supérieure en plus de l'effet escalier. Ainsi, dans la figure 1.36, ils considèrent des couches d'épaisseur  $Lt$  qui forment des marches de largeur  $W$  correspondant à une surface idéale inclinée à un angle  $\alpha = \tan^{-1}(Lt/w)$ . Les fraction des particules  $\lambda$ , pour des raisons de simplicité, sont modélisées comme si elles avaient une section carrée (en noir sur la Figure 1.38 et sont représentées attachées à la pièce le long de la longueur unitaire du bord de la marche. La coupe transversale de la surface modélisée est représentée perpendiculaire à la direction du laser et orientée de manière à ce que la surface idéale soit horizontale.



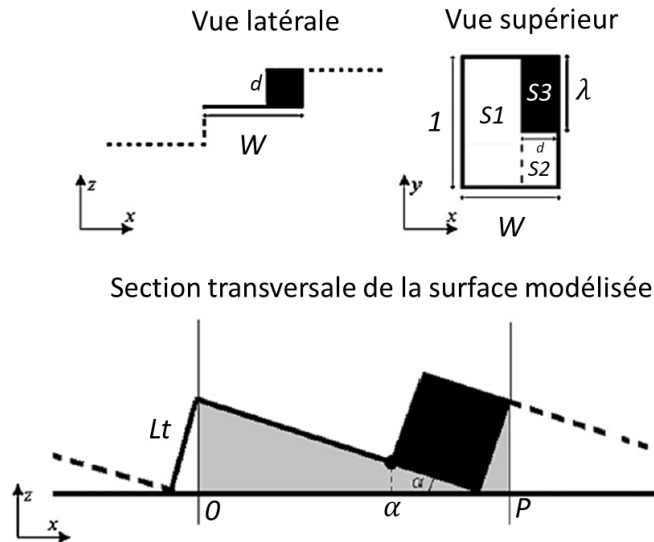


Figure 1.38 – Représentation schématique de la vue latérale et de la vue supérieure avec la fraction de particules  $\lambda$  et la section transversale de la surface modélisée [79]

En considérant un seul intervalle de pas entre 0 et  $P$  (comme indiqué sur la figure 1.37), l'intégrale de la rugosité  $Ra$  peut être divisée en trois intégrales sur les régions S1, S2 et S3 respectivement:

$$Ra(\alpha, \lambda) = \frac{1}{P} \int_0^\alpha |F(x) - \bar{F}| dx + \frac{1-\lambda}{P} \int_\alpha^P |F(x) - \bar{F}| dx + \frac{\lambda}{P} \int_\alpha^P |F'(x) - \bar{F}| dx \quad (8)$$

Où  $F(x)$  – profil unidimensionnel décrivant la marche de l'escalier;

$F'(x)$  – profil unidimensionnel décrivant la marche d'escalier et les particules attachées ;

$\lambda$  – fraction des particules;

$P$  – le pas;

$\bar{F}$  – la ligne moyenne est calculée comme :

$$\bar{F} = \frac{1}{P} \int_0^\alpha F(x) dx + \frac{1-\lambda}{P} \int_\alpha^P F(x) dx + \frac{\lambda}{P} \int_\alpha^P F(x) dx \quad (9)$$

La comparaison du modèle avec les données expérimentales a montré un bon accord pour les angles d'inclinaison compris entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$ . Les surfaces horizontales et quasi-horizontales sont prédites avec une erreur de plus de 40%. En général, ces surfaces sont de meilleure qualité que les surfaces verticales [35,79].

Boschetto et al. tiennent compte de l'effet d'escalier et des défauts réels, pour les pièces AlSi10Mg fabriquées par LPBF [35]. Leur analyse a montré que les surfaces horizontales et verticales sont très différentes : la première est caractérisée par des défauts rares et une faible valeur de rugosité moyenne; le second est remplie d'effet balling induisant une surface rugueuse. Les surfaces inclinées montrent l'effet combiné de telles morphologies. Ainsi, deux équations de profil différentes sont considérées et

combinées: lorsque l'angle d'inclinaison change, la contribution à la rugosité moyenne change car différentes longueurs de profil horizontal sont prises en compte. La Figure 1.39 montre que la ligne moyenne dépend de l'angle et de la forme du profil, ce qui conduit à des coupes différentes et à une mise en place partielle des profils eux-mêmes. Par conséquent, deux fonctions de profil différentes s'appliquent aux surfaces horizontales  $H(x)$  et verticales  $V(x)$ .

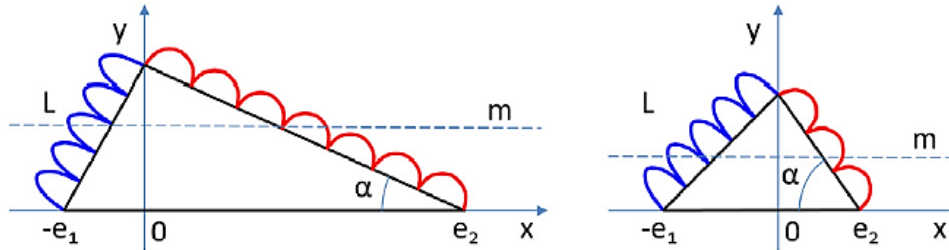


Figure 1.39 – Représentation schématique d'un profil d'escalier avec des particules attachées pour différents angles d'inclinaison  $\alpha$  [35]

La rugosité moyenne peut être calculée comme:

$$\begin{aligned}
 Ra &= \frac{1}{-e_1 + e_2} \int_{-e}^e |p(x) - m| dx \\
 &= \frac{1}{-e_1 + e_2} \left( \int_{-e_1}^0 |xcot\alpha + Lcos\alpha + V(x) - m| dx \right. \\
 &\quad \left. + \int_0^{e_2} |Lcos\alpha - xtana + H(x) - m| dx \right) \quad (9)
 \end{aligned}$$

Où  $p(x)$  – le profil acquis;

$L$  – l'épaisseur de couche;

$\alpha$  – angle d'inclinaison;

$-e_1 = Lsin\alpha$ ;

$e_2 = L \frac{cos^2\alpha}{sin\alpha}$ ;

$m$  – la ligne moyenne.

Les fonctions de profil horizontales et verticales sont décrites comme suit:

$$\begin{aligned}
 H(x) &= A_H sin^2(x\pi/L) \\
 V(x) &= A_V sin^2(x\pi/L) \quad (10)
 \end{aligned}$$

Où  $A_H$  et  $A_V$  – les amplitudes du profil horizontal et vertical respectivement.

En incorporant des facteurs de procédé supplémentaires dans la modélisation, le pourcentage d'erreur entre les données expérimentales et théoriques a effectivement été réduit, en particulier pour les surfaces horizontales et verticales. Cependant, une prédiction plus précise de la topographie des surfaces générées est possible en considérant la géométrie du bain de fusion d'un seul cordon. Il est constaté qu'il existe une relation entre les paramètres de la zone de fusion et la rugosité de surface finale [80,95].

**Modèles basés sur la morphologie du bain de fusion**

Un modèle analytique de la corrélation entre la géométrie du bain de fusion et la surface latérale des cordons est développé pour le matériau Ti6Al4V dans l'étude de dépôt direct de métal (DMD) [80]. Ce modèle est basé sur des données expérimentales qui confirment l'influence des principaux paramètres du procédé (énergie linéaire, phénomènes physiques, etc.) sur la géométrie du bain de fusion et par conséquent sur la microrugosité de surface. La dégradation des surfaces dépend de deux aspects différents : l'adhésion de particules non fondues ou partiellement fondues et la formation des ménisques latéraux ( $W$  en  $\mu m$ ) Figure 1.40 avec des rayons de courbure plus ou moins prononcés.

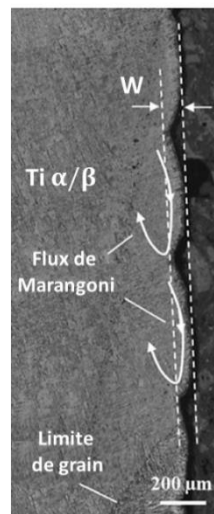


Figure 1.40 – Formation périodique des ménisques sur la surface latérale des cordons [80]

Le modèle géométrique décrit analytiquement la formation du ménisque à partir d'une géométrie de zone solidifiée donnée. Chaque bain de fusion solidifié est donc considéré comme la somme de deux demi-ellipses: une pour la partie supérieure, l'autre pour la partie inférieure (coupe 2D Figure 1.41):

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \tag{11}$$

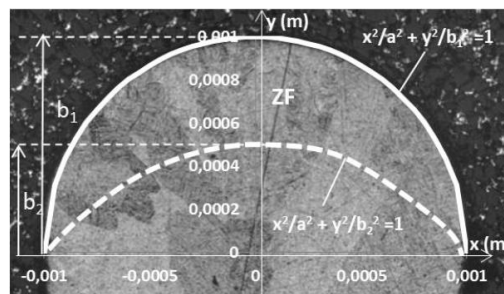


Figure 1.41 – Formulation analytique des contours de la zone fondue [80]

L'intersection de ces deux demi-ellipses (Figure 1.42), décalées d'une valeur  $\Delta h$ , en un emplacement  $(x_c, y_c)$ , a permis de calculer la hauteur moyenne du ménisque  $Wp$ :

$$W_p = \frac{e}{2} \left( 1 - \left( \sqrt{1 - \left( \frac{\Delta h}{b_1 \left( 1 \pm \frac{1}{n} \right)} \right)^2} \right) \right) \quad (12)$$

Où  $W_p$  – hauteur moyenne du ménisque;  
 $e$  – largeur du bassin de fusion;  
 $b_1$  – hauteur du bain de fusion supérieur;  
 $b_2 = \frac{b_1}{n}$  – hauteur du bain de fusion inférieur;  
 $n$  – facteur de forme,  
 $\Delta h$  – distance de cisaillement du bain de fusion.

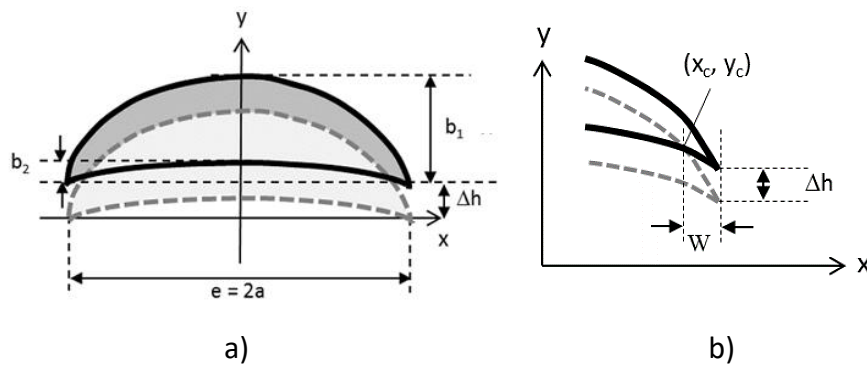


Figure 1.42 – Schéma pour le calcul de la hauteur du ménisque  $W$ : a) principe du modèle : coupe transverse avec translation de la zone fondue de  $\Delta h$  selon  $y$ ; b) zoom sur la partie latérale avec point d'intersection  $(x_c, y_c)$  [80]

Cette formule montre que des ménisques plus petits, et donc des surfaces planes, peuvent être obtenues avec des bains de fusion larges et profonds. C'est-à-dire que la hauteur du ménisque  $W$  diminue linéairement avec des rapports  $b_1/\Delta h$  élevés (Figure 1.43).

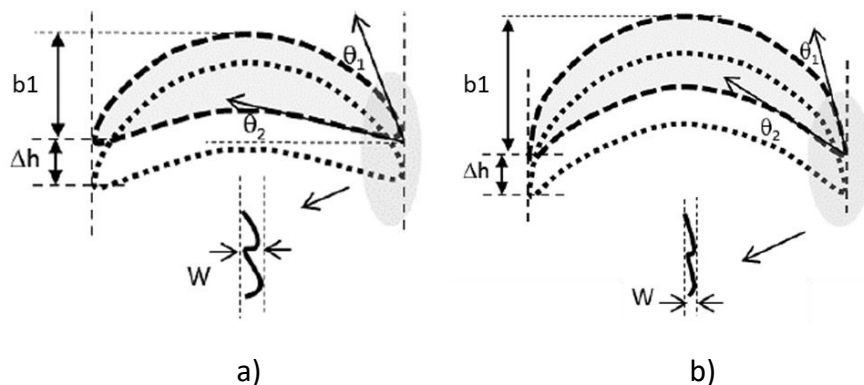


Figure 1.43 – Schématisation de l'effet de  $b_1$  et  $\Delta h$  sur la hauteur du ménisque: a) rapport  $b_1/\Delta h$  moyen b) rapport  $b_1/\Delta h$  élevé [95]

La limite du modèle réside dans la géométrie du bain de fusion qui n'est pas directement liée aux paramètres du procédé comme la puissance ( $P$  en  $W$ ) et la vitesse

du laser ( $V$  en  $mm/s$ ). Le seul facteur contrôlable est le facteur de forme ( $n = b_1/b_2$ ), qui dépend principalement du flux thermoconvectif, puis le coefficient  $T = d/dT$  qui est maintenu constant. Cela permettrait de prendre en compte l'influence des propriétés des matériaux et des gradients de température près de la zone d'interaction laser – poudre – bain de fusion.

Le Tableau 1.7 présente un résumé des modèles décrits ci-dessus.

Tableau 1.7– Résumé des modèles existants dans la littérature prédisant la rugosité de surface

Modèle basé sur:	Procédé	Paramètres pris en compte	Surface modelée	Réf.
Effet escalier	SLA FDM	$t$ – épaisseur de couche; $\theta$ – orientation de fabrication.	Latérale	[77] [88-93]
Effet escalier et puissance du laser	SLS	$P$ – puissance laser; $t$ – épaisseur de couche; $\theta$ – orientation de fabrication.	Latérale	[94]
Effet escalier et particules attachées	LPBF	$F(x)$ – le profil unidimensionnel décrivant la marche de l'escalier; $F'(x)$ – le profil unidimensionnel décrivant la marche d'escalier et les particules attachées ; $\lambda$ – fraction des particules; $P$ ou $e_1$ et $e_2$ – seule période du pas; $\bar{F}$ ou $m$ – la ligne moyenne $L$ – l'épaisseur de couche; $\alpha$ – angle d'inclination	Latérale	[35] [79]
Bain de fusion	DMD	$e$ – largeur du bassin de fusion ; $b_1$ – hauteur du bain de fusion supérieur; $b_2$ – hauteur du bain de fusion inférieur $n = \frac{b_1}{b_2}$ – facteur de forme ; $\Delta h$ – distance de cisaillement du bain de fusion.	Supérieure	[80] [95]

En résumé, très peu de modèles existent pour prédire la rugosité des surfaces notamment dans le procédé LPBF. En effet, il n'existe pas de modèles basés sur les rayons de courbure du bain de fusion pour le début et la fin du cordon (surface latérale de la pièce). Par exemple, si la surface est considérée comme une combinaison de cordons de début, de fin et de côté. Cette approche permettrait de prendre en compte des facteurs de procédé supplémentaires et de prédire la topographie de la surface en fonction de différentes stratégies de balayage.

## 1.6. Objectifs de la thèse

L'état de l'art, réalisé dans ce chapitre, synthétise les résultats des études portant sur la topographie des surfaces brutes issues de fabrication additive (notamment le procédé de fusion laser sur lit de poudre LPBF).

Cet état de l'art montre un manque de compréhension globale des mécanismes influençant l'état de surfaces des pièces finales. De nombreuses études se concentrent uniquement sur l'effet des paramètres du procédé sur la densité, la microstructure et les propriétés mécaniques des pièces finales. D'autres n'examinent que la topographie de la surface supérieure. Seules quelques études considèrent simultanément la densité et la rugosité des surfaces latérales des pièces. De plus, peu de travaux mettent en évidence les facteurs et phénomènes physiques qui affectent la rugosité des surfaces latérales. Enfin, la plupart des études cherchant à améliorer la qualité de la surface latérale se limitent au post-traitement tel que l'usinage ou le polissage.

De ce qui précède, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Les mécanismes de génération des surfaces latérales dans le procédé LPBF sont encore mal compris;
- La rugosité de la surface latérale est rarement optimisée tout en gardant à l'esprit l'optimisation de la densité des pièces;
- Les dispersions de la topographie de surface dues au procédé ne sont souvent pas prises en compte, ce qui rend l'analyse de corrélation difficile;
- Il existe peu de modèles analytiques permettant de prédire la rugosité de surface latérale dans le procédé LPBF.

Dans ce contexte, cette thèse est consacrée à:

- (1) La compréhension de la génération des surfaces en fonction des paramètres primaires : compréhension du procédé LPBF en trouvant une fenêtre de paramètres optimale pour l'AlSi10Mg en termes de rugosité de la surface latérale et de densité du matériau (Chapitre 3);
- (2) L'analyse de la dispersion de la rugosité de surface latérale due au procédé LPBF: reproductibilité du procédé sur différents plateaux de construction, reproductibilité du procédé sur un même plateau de construction, dispersion de la rugosité de surface sur une même pièce, dispersion de la rugosité de surface sur une seule face d'une même pièce. Sur la base de cette analyse, des recommandations d'acquisition de surface sont proposées et appliquées au reste de l'étude (Chapitre 4);
- (3) Compréhension de la génération des surfaces en fonction des paramètres secondaires tels que la compensation, le contour et des combinaisons de paramètres (Chapitre 5);
- (4) Proposition d'un modèle numérique de prédiction des topographies de surfaces latérales en fonction de la géométrie de bain fondus et des paramètres secondaires tels que la compensation et le contour (Chapitre 6).

L'étude se focalise sur l'alliage d'aluminium AlSi10Mg. Cet alliage est très adapté à la création de pièces aéronautiques à l'aide de technologies additives. Il présente une excellente combinaison de faible poids et de bonnes propriétés mécaniques avec une conductivité thermique élevée. Les méthodes expérimentales mises en œuvre au cours de cette thèse sont présentées au Chapitre 2.

---

# Chapitre 2 : Méthodes expérimentales

---

## Sommaire

---

<b>2.1. Production des échantillons</b> .....	76
2.1.1. Caractérisation et préparation de la poudre.....	76
2.1.1.1. Matériaux: alliage d'aluminium AlSi10Mg.....	76
2.1.2. Elaboration des échantillons AlSi10Mg.....	78
2.1.2.1. Conditions de procédé: Equipement et les paramètres fixes .....	78
<b>2.2. Paramètres secondaires du procédé</b> .....	82
<b>2.3. Approche expérimentale</b> .....	85
<b>2.4. Caractérisation des échantillons</b> .....	86
2.4.1. Moyens d'analyse des porosités .....	87
2.4.1.1. Méthode d'Archimède.....	87
2.4.1.2. Microscope optique.....	88
2.4.2. Moyens d'analyse de la topographie des surfaces .....	89
2.4.2.1. Microscope à variation focale.....	89
2.4.2.2. Microscope électronique à balayage (MEB).....	91
2.4.2.3. Prétraitement et post-traitement des topographies acquises (MEB).....	92

---



Ce chapitre présente les méthodes expérimentales mises en œuvre au cours de la thèse. Il peut être divisé globalement en deux parties : (1) la production d'échantillons et (2) la caractérisation des échantillons.

La première partie du chapitre explique les principaux aspects de la production et de l'optimisation des échantillons de la thèse. Elle comprend une section sur la sélection et la préparation de la poudre notamment le matériau, la morphogranulométrie et le prétraitement. Cette partie comprend également une section sur l'élaboration des échantillons, qui présente les conditions de procédé, l'équipement et les paramètres procédés.

La deuxième partie du chapitre s'attache aux moyens de caractérisation de la porosité et de la rugosité des échantillons. La porosité est évaluée à l'aide de deux méthodes : la méthode d'Archimède (analyse de la porosité en 3D) et le microscope optique (analyse de la porosité en 2D). En ce qui concerne l'analyse de la topographie de surface, un microscope à variation focale et un microscope électronique à balayage sont utilisés.

### 2.1. Production des échantillons

La production d'échantillons est une étape importante de cette étude. Cette étape identifie les principales démarches pour atteindre les objectifs et optimiser la fonctionnalité des pièces finales. Ce paragraphe peut donc être divisé en deux sections:

- Préparation et caractérisation de la poudre sélectionnée
- Elaboration des échantillons

#### 2.1.1. Caractérisation et préparation de la poudre

La sélection de la poudre et sa préparation pour le procédé LPBF sont effectuées en tenant compte des recommandations établies dans la revue de la littérature du premier chapitre. Par conséquent, des paramètres tels que la morphologie, la granulométrie, les propriétés physiques et chimiques de la poudre sont étudiées pour obtenir une mise en couche homogène et réduire le risque des phénomènes indésirables lors de l'interaction laser-poudre.

##### 2.1.1.1. Matériaux: alliage d'aluminium AlSi10Mg

Le choix du matériau s'est porté sur l'alliage d'aluminium AlSi10Mg délivré par le fournisseur – TLS Technik<sup>1</sup>. Cet alliage présente de bonnes propriétés de moulage et a donc une meilleure maniabilité (facilité de manipulation) par les technologies additives notamment le procédé de fusion laser sur lit de poudre. De plus, la présence de 10% de silicium dans la composition de l'alliage améliore ses propriétés de façon significative (Tableau 2.1). Le silicium augmente l'absorption du rayonnement laser et permet de réduire la probabilité de retrait au cours de la solidification. Un retrait moindre limite les contraintes résiduelles et de ce fait évite l'apparition de fissures dans les pièces solides.

---

<sup>1</sup> TLS Technik GmbH, Germany. <http://www.tls-technik.de>

Tableau 2.1– AlSi10Mg composition chimique en poids % (TLS Technik)

Al	Si	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	Autre
Le reste	9-11	0,2-0,45	≤0,55	≤0,05	≤0,1	≤0,45	≤0,05

### **Morphogranulométrie**

La poudre AlSi10Mg utilisée est obtenue par atomisation gazeuse et présente donc une forme de particules sphérique. La Figure 2.1 montre deux images de la morphologie de cette poudre avec le grossissement 1000× et 4000×. Ces images sont prises avec un Microscope Electronique à balayage (MEB) TESCAN Vega II SBH<sup>2</sup>.

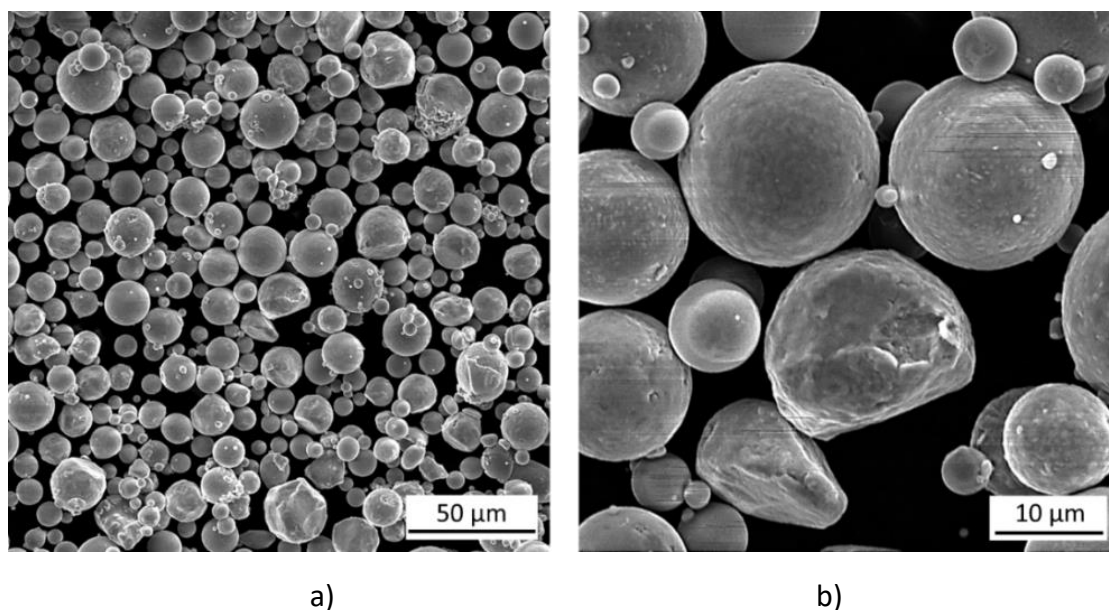


Figure 2.1 – Images MEB de la poudre AlSi10Mg utilisée pour cette étude: a) grossissement 1000×; b) grossissement 4000×

La répartition de taille de la poudre sélectionnée est centrée entre 5 µm et 25 µm. Comme il est déjà indiqué au chapitre Chapitre 1 (paragraphe 1.4.2.1), les particules fines sont facilement fondues par laser et forment un bain de fusion lisse. Cette répartition permet également de choisir une épaisseur de couche faible et ainsi minimiser l'effet escalier.

La mesure granulométrique est réalisée par un granulomorphomètre OCCHIO 500nano<sup>3</sup>. La distribution granulométrique est détaillée sur la Figure 2.2. Elle signifie que 10% des particules ont un diamètre inférieur à 11.2 µm, 50 % à 17.5 µm et 90 % à 26.7 µm.

<sup>2</sup> TESCAN, Czech republic. <http://www.tescan.com>

<sup>3</sup> Occhio, USA. <http://www.occhio-usa.com>

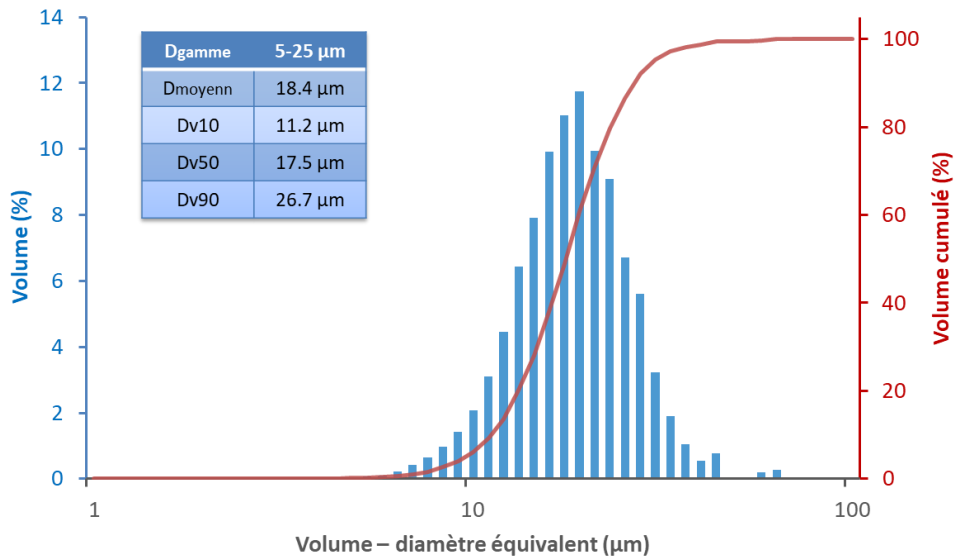


Figure 2.2 – Distribution granulométrique de la poudre AlSi10Mg utilisée pour la thèse

### Préparation de la poudre

La poudre est étuvée avant chaque utilisation pendant 1 heure à 100 °C afin d'éliminer les contaminants tels que l'humidité, les matières organiques, les gaz adsorbés et les films d'oxyde. Cela permet d'améliorer la mise en couche de la poudre et l'interaction laser-matière.

## 2.1.2. Elaboration des échantillons

### 2.1.2.1. Conditions de procédé: Equipement et les paramètres fixes

#### Equipement

Les échantillons lors de ces travaux de thèse sont élaborés à l'aide de la machine de fusion laser ProX DMP 200<sup>4</sup> (Figure 2.3), équipée d'un laser à fibre de puissance maximale 400W. Le diamètre du faisceau laser est 70 µm.



Figure 2.3 – Machine de fusion laser ProX DMP 200

<sup>4</sup> 3D Systems, USA. <http://www.3dsystems.com>

La machine possède une zone de fabrication de dimensions  $140 \times 140 \times 100 \text{ mm}^3$  (x, y, z). Les principales caractéristiques techniques de la machine sont résumées et présentées dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 – Principales caractéristiques techniques de la machine ProX DMP 200 LPBF

Paramètres	Valeurs
Longueur d'onde laser (nm)	1070
Puissance laser maximale, P (W)	400
Diamètre du faisceau laser $\phi$ ( $\mu\text{m}$ )	70
Plage de vitesse V (mm/s)	300-2000
Zone de fabrication	140x140x100
Plage d'épaisseur de la couche, $\mu\text{m}$	10-50

La distribution de poudre dans la machine se fait via un bac d'alimentation soulevé par un piston. La poudre est étalée sur le plateau de construction par un rouleau. L'enceinte de travail est inertée par un flux latéral d'argon pour éviter les phénomènes d'oxydation. Ce flux est dirigé de la droite vers la gauche. Le flux d'argon et l'aspiration, permet d'évacuer la fumée et les émissions qui se produisent lors de l'interaction laser-lit de poudre. Cela permet d'éviter la contamination du lit de poudre et des échantillons en cours de fabrication. La distribution de la poudre, la direction du flux d'argon et la direction d'aspiration sont montrées sur la Figure 2.4.

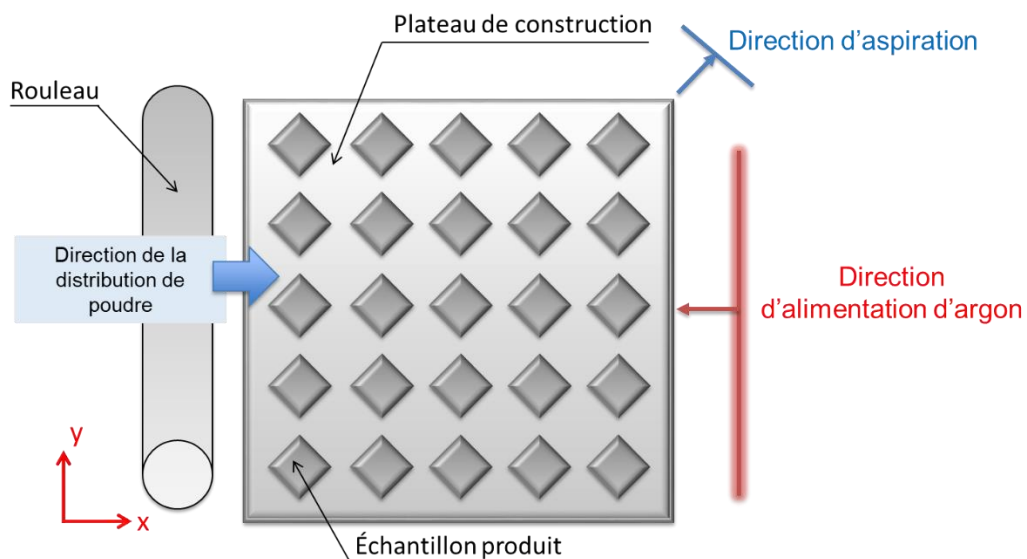


Figure 2.4 – Vue de dessus du plateau de construction montrant la distribution de poudre, les directions de gaz et la disposition des échantillons

### **Les paramètres procédé fixés**

Il est décidé que l'épaisseur de couche, la taille du faisceau laser et la focalisation sont fixés et ne changent pas pour toutes les études de la thèse. Ces valeurs fixes correspondent aux recommandations du fabricant et sont répertoriées dans le Tableau 2.3

Tableau 2.3 – Liste des paramètres fixes

Paramètres fixes	Valeurs
Diamètre du faisceau laser $\phi$ , ( $\mu\text{m}$ )	70
Focalisation	0
Épaisseur de couche, $d$ ( $\mu\text{m}$ )	30

De plus, tous les échantillons sont fabriqués avec les dimensions de  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ . Chaque couche est balayée avec la stratégie « Aller-retour croisé », et la direction du balayage est décalée de  $90^\circ$  d'une couche à l'autre (partie droite de la Figure 2.5). Les échantillons sont placés à un angle de  $45^\circ$  par rapport à la direction de distribution de la poudre (voir Figure 2.6 et section **Préparation des fichiers numériques**).

Les surfaces Face 1 et Haut (partie gauche de la Figure 2.5) sont toujours choisies comme surfaces de référence pour mesurer les valeurs de rugosité.

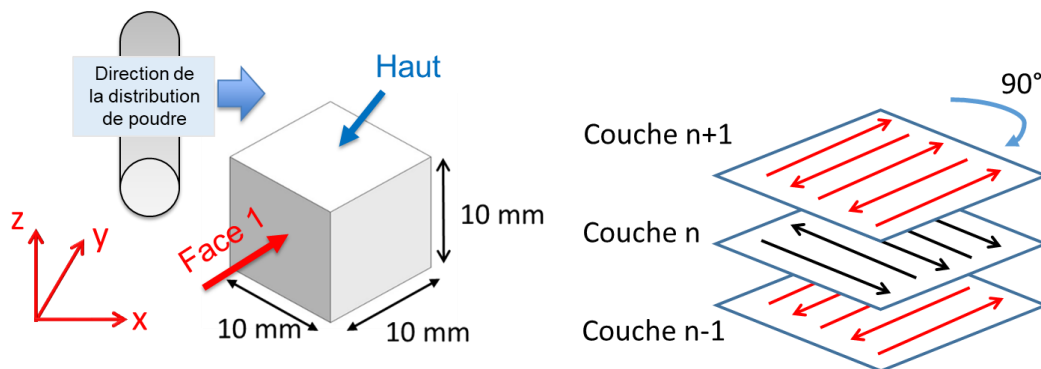


Figure 2.5 – Gauche: échantillon d'essai avec les surfaces Face 1 et Haut sélectionnées pour mesurer les valeurs de rugosité de surface; Droite: stratégie de balayage avec des cordons aller-retour tournés de  $90^\circ$  d'une couche à l'autre

### **Procédure de fabrication des échantillons**

La fabrication d'échantillons sur machine ProX 200 est généralement effectuée dans l'ordre suivant:

#### **Préparation des fichiers numériques**

Les échantillons simples en forme de cube sont directement créés dans le fichier de production « Manufacturing », puis orientés sur le plateau de production à un angle de  $45^\circ$  par rapport à la direction de distribution de la poudre. Cette orientation réduit la surface de contact primaire entre l'échantillon et le rouleau (Figure 2.6), évitant ainsi un frottement élevé entre eux au premier instant de contact.

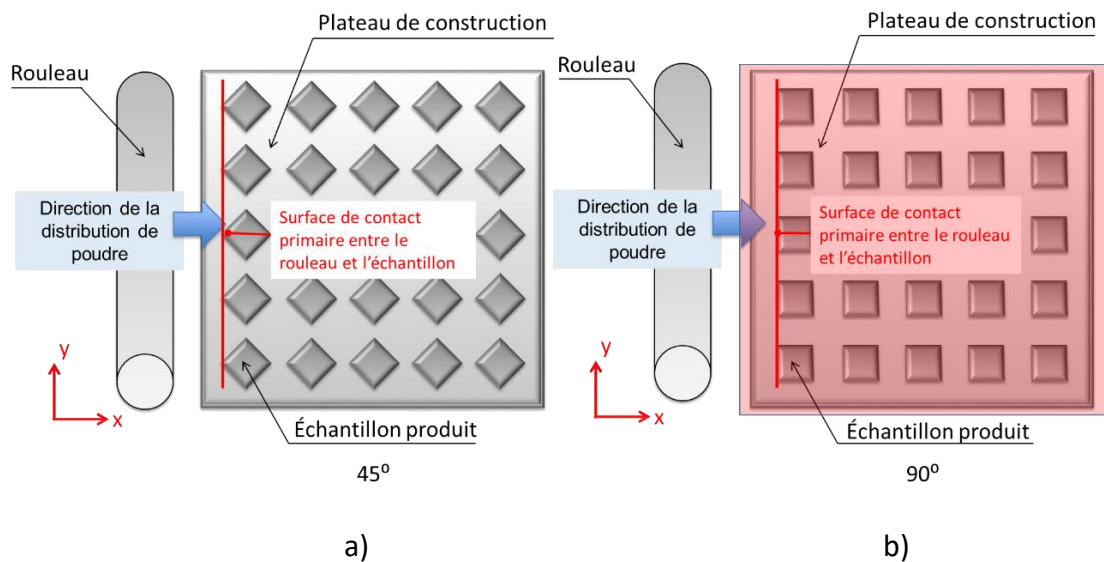


Figure 2.6 – Deux types d'orientation des échantillons sur le plateau par rapport à la direction de la distribution de poudre: a) angle de  $45^\circ$  – contact primaire minimal entre le rouleau et l'échantillon; b) angle de  $90^\circ$  – contact primaire maximal entre le rouleau et l'échantillon

Les supports sont ensuite créés automatiquement pour la surface inférieure du cube sous la forme de plans de  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  et d'une hauteur de 1 mm. Ils permettent d'obtenir une répartition homogène du lit de poudre, car les premières couches de poudre adhèrent au plateau et ne sont donc pas toujours homogènes.

Enfin, les paramètres de production sont configurés pour chaque échantillon. Certains d'entre eux sont constants (épaisseur de la couche, stratégie, etc. voir le tableau 2.3) d'autres varient (puissance, vitesse, l'écart vecteur, etc.) en fonction de l'étape de l'expérience.

Après avoir indiqué tous les paramètres requis, l'échantillon peut être tranché numériquement et chaque couche peut être visualisée directement sur l'écran avec la stratégie de balayage associée. Dans une dernière étape, le fichier créé (avec l'extension .FAB3) est exporté vers la machine.

#### Préparation de la machine

Au début d'une campagne d'essais (lors du changement de matériau), tous les contenants machine (réservoir, conduits, enceinte, etc.) doivent être entièrement nettoyés pour éviter toute contamination. Ensuite, la machine est chargée à travers un sas de poudre préparée à l'avance. La rugosité de la surface du plateau est préalablement augmentée pour améliorer l'adhérence des premières couches de poudre. Le réglage de la hauteur du plateau pour la première couche d'une épaisseur de  $5 \mu\text{m}$  est fait manuellement. Les couches suivantes, d'une épaisseur fixe de  $30 \mu\text{m}$ , sont appliquées automatiquement. Ensuite le système d'inertage du gaz (argon) est démarré. Des niveaux d'oxygène inférieurs à 0,1% sont utilisés pour les tests. Le débit d'argon dans l'enceinte est contrôlé par une pompe.



### Fabrication

La poudre est récupérée et étalée sur le plateau grâce à un rouleau (Figure 2.7). Le trop plein de poudre est évacué dans un réservoir situé à droite du plateau. Le rouleau revient alors à sa position initiale en compactant le lit de poudre. Le laser génère ensuite des échantillons à partir du fichier de production numérique. Puis le plateau descend d'une épaisseur de couche et le procédé se répète. Le procédé de fabrication peut être surveillé à partir d'une fenêtre avant.

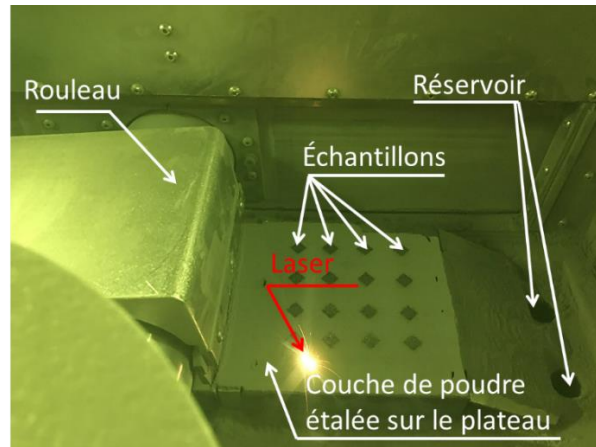


Figure 2.7 – Fabrication des échantillons

### Déchargement du plateau et de la poudre

Une fois la fabrication terminée les échantillons sont dépoutrés et le plateau peut être retiré de l'enceinte à travers le sas. La poudre récupérée dans le réservoir peut être tamisée et réutilisée. Cependant pour la thèse une poudre neuve est utilisée pour chaque test.

### Découpe d'échantillons

La découpe d'échantillons dans les plateaux a été réalisée par SARL Stradom Electroérosion à fil<sup>5</sup>. L'électroérosion par fil est un procédé dans lequel un fil conducteur tendu est utilisé comme électrode pour découper ou profiler des échantillons. Enfin, avant la caractérisation, les échantillons sont nettoyés par ultrasons dans une solution d'éthanol pur.

## 2.2. Paramètres secondaires du procédé

### Stratégies de fusion

La stratégie de fusion est la trajectoire par laquelle le faisceau laser fait fondre la poudre pour construire une pièce. Il existe de nombreux types de stratégies de construction explorées dans la littérature. L'influence des stratégies sur les contraintes résiduelles, la microstructure, les propriétés mécaniques et la porosité des pièces est considérée [82-84]. La stratégie de balayage est donc un paramètre crucial du procédé LPBF. Par exemple, des contraintes résiduelles excessives entraînent une déformation,

<sup>5</sup> Stradom, France. <http://stradom.fr/>

qui a également un effet sur la topographie de la surface. De même, une accumulation excessive de chaleur sans temps de refroidissement adéquat peut entraîner l'effet de balling sur les surfaces de l'échantillon [85]. Malgré cela, l'effet des stratégies de balayage sur la rugosité de surface est mal compris.

Les stratégies les plus employées sont les stratégies linéaires et en îlot. La stratégie linéaire est constituée de lignes droites et continues du vecteur de balayage (Figure 2.8 a). Dans la stratégie des îlots, la surface de fusion est divisée en plusieurs sections sous forme de carrés (Figure 2.8 b) ou d'hexagones. Dans ce cas, le vecteur de balayage est limité par la taille de la section. La taille des sections varie généralement de 2 à 5 mm.

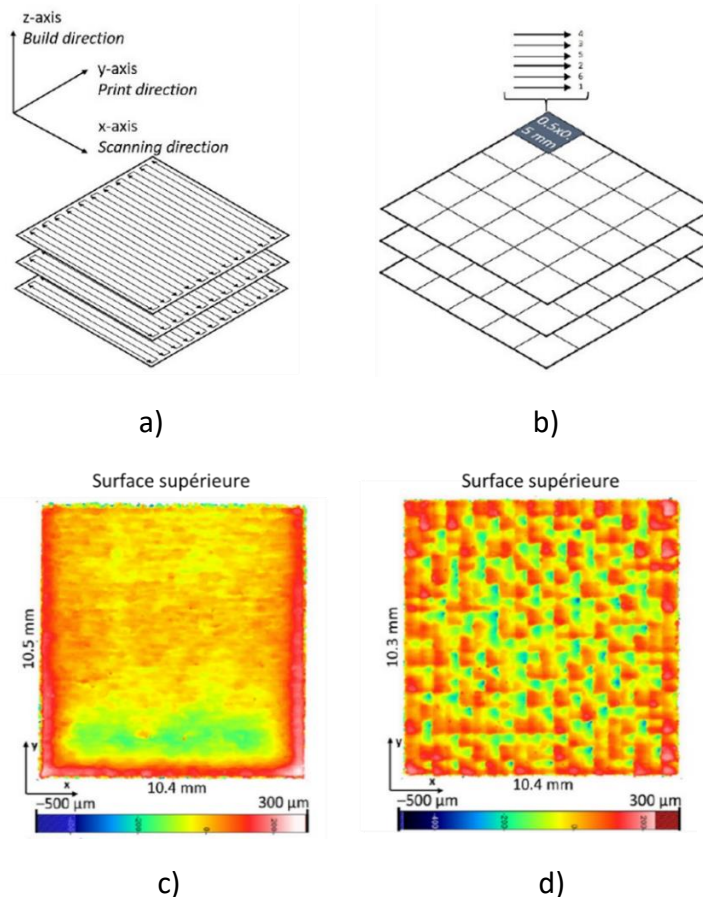


Figure 2.8 – Relation entre la stratégie de fusion et la topographie de surface supérieure: a) stratégie linéaire; b) stratégie en îlots (damier) [82]

Valente et al. [82] montrent qu'une surface supérieure relativement plane est produite principalement en choisissant une stratégie de balayage linéaire (Figure 2.8 c). Dans le cas d'une stratégie en îlot, des défauts de fusion apparaissent entre les sections de balayage (Figure 2.8 d). Ces défauts conduisent à une détérioration de la topographie de surface. En effet, l'altitude des nuages de points sur les bords des îlots (à la fin du trajet de balayage) est plus élevée qu'au milieu de l'îlot. L'effet de bord est significatif pour les stratégies des îlots. Ces stratégies comportent plus de matière près des bords des sections divisées, ce qui crée plus de rugosité dans l'échantillon.

Dans le cas d'une surface verticale, en raison du contact avec le lit de poudre, la thermique du procédé devient plus complexe, ce qui augmente la rugosité. Les valeurs de rugosité élevées sont conservées quelle que soit la stratégie de fusion. Les principales



méthodes pour réduire ces rugosités sont le balayage de contour et la compensation. [82, 86-87].

### **Post-scanning**

Le post-scanning est une méthode importante pour améliorer la rugosité de surface supérieure dans le procédé LPBF. Cette méthode désigne un re-balayage de la couche principale qui a déjà fondu et solidifié. Dans un premier temps le laser fait fondre la couche de poudre avec les paramètres de référence. Par la suite, le laser balaye la même couche (surface solidifiée) avec les paramètres de post-scanning. La couche refondue devient donc plus lisse et certains défauts peuvent être éliminés.

Le re-balayage de chaque couche permet d'éliminer les micropores dans les pièces et améliore également les propriétés mécaniques. Cependant il augmente le temps de production. En cas d'amélioration de l'état de surface, il est préférable d'appliquer le post-scanning uniquement sur la dernière couche ou sur la surface extérieure des pièces [48].

E. Yasa et al. [48] a constaté que pour le post-scanning, l'utilisation d'un écart vecteur et d'une vitesse de balayage plus petits par rapport aux paramètres de référence permet d'obtenir une meilleure qualité de surface. De plus, la rugosité a diminué lorsque le temps de refonte a augmenté [42].

### **Compensation et contour**

La compensation ou "skywriting scanning" et réglage de contour peut être très utile pour réduire la rugosité des surfaces verticales [43, 47, 48]. Par exemple, T. Yang et al. [43] ont trouvé que l'échantillon sans skywriting a des bords plus rugueux et plus irréguliers que celui avec skywriting. L'option skywriting offre la possibilité de minimiser l'effet d'inertie du laser pendant son accélération et sa décélération. En effet, lorsque le laser est accéléré au début de la fusion et décéléré à la fin, il parcourt une certaine distance à une vitesse non constante. Par conséquent, l'énergie appliquée sur les bords de la pièce est plus importante que celle appliquée à l'intérieur, ce qui entraîne une densité d'énergie non uniforme et des bords irréguliers [43]. Malgré cela, très peu de recherches considèrent la compensation et ses paramètres comme un moyen de réduire les bords rugueux de la pièce. L'effet de la compensation sur la rugosité reste donc un domaine relativement inexploré.

En ce qui concerne le balayage de contour, c'est l'une des principales méthodes pour améliorer la qualité des surfaces latérales. Le balayage de contour est principalement utilisé pour refondre les bord d'une couche, après le lasage interne, afin de réduire l'amplitude de la rugosité et augmenter la précision dimensionnelle [43, 47, 48]. Le contour peut également être défini avant le lasage interne, mais il y a peu de données dans la littérature montrant les avantages des pré-contours par rapport aux post-contours [88].

Il existe également des études sur l'effet de différents paramètres de contour sur l'état de surface [43, 47, 48, 88]. Par exemple, il a été constaté que l'utilisation d'une vitesse de balayage plus lente améliore la rugosité de 10 à 15 % [48]. Par conséquent, il est généralement admis que la modification des paramètres du contour réduit la valeur de la rugosité, mais pas de manière significative.

En outre, certains inconvénients de cette méthode sont rapportés dans plusieurs références:

- Comportements métallurgiques potentiellement différents entre le cœur et le contour [89].
- Porosités potentielles entre le cœur et le contour [90, 91].
- Le balayage des contours est néfaste pour les surfaces légèrement inclinées ( $\alpha < 30^\circ$ ) [34, 92].

Pour ces raisons, les réglages de contour ne sont pas considérés comme la seule solution pour améliorer la rugosité dans cette étude.

## 2.3. Approche expérimentale

Les différentes séquences expérimentales de cette étude sont présentées ci-dessous:

- Deux étapes dans la compréhension de la génération des surfaces en vue d'optimiser le procédé LPBF : i) étude de l'influence des paramètres primaires sur la rugosité latérale et la densité des pièces; ii) étude des paramètres secondaires pour mieux comprendre la génération de la surface latérale et optimiser sa rugosité;
- Analyse de la dispersion de la rugosité des topographies latérales est réalisée après la première étude et des recommandations de caractérisation de surface sont proposées et appliquées pour la suite de l'étude.
- Modélisation numérique des surfaces latérales.

### Étude d'influence des paramètres primaires sur la rugosité latérale et la densité des pièces (Chapitre 3)

Les paramètres de base du procédé LPBF, tels que la puissance du laser ( $P, W$ ), la vitesse de balayage ( $V, mm/s$ ) et l'écart vecteur ( $h, \mu m$ ), sont d'abord optimisés. L'épaisseur de la couche ( $d, \mu m$ ) et le stratégie de balayage sont les paramètre fixes (voir section **Les paramètres procédé fixés**). L'étude est mise en œuvre pour deux campagnes de tests : i) en utilisant une faible puissance de 100W; ii) en utilisant des puissances supérieures à 100W. L'optimisation s'effectue en deux étapes:

- La forme des premiers cordons est optimisée en faisant varier la puissance et la vitesse du laser: optimisation de la densité d'énergie linéaire (LED). La LED ( $E_L, J/mm$ ) est définie comme le rapport entre la puissance du laser et la vitesse de balayage (voir équation (2), Chapitre 1) et est utilisée pour cette première étape d'optimisation;
- Ensuite, sur la base de la fenêtre optimale de puissance et de vitesse du laser trouvée, une optimisation volumique est effectuée: une densité d'énergie volumique VED ( $E_V, J/mm^2$ ) est définie et sert de paramètre unique pour optimiser les volumes construits. La VED est calculée selon équation (3) (Chapitre 1). Une large gamme de vitesses de balayage, de puissances laser et d'écart vecteurs peut être ainsi examinée. La fenêtre

de paramètres avec la valeur optimale de rugosité et de densité peut alors être définie.

### **Analyse de la dispersion de la rugosité des surfaces latérales (Chapitre 4)**

Après la première optimisation, une étude de dispersion de la rugosité des surfaces latérales est réalisée pour évaluer la reproductibilité du procédé. Pour l'ensemble optimal donné de paramètres primaires trouvés, la reproductibilité du procédé en termes de rugosité est évaluée pour différents plateaux (même disposition des échantillons) et également pour différentes positions d'échantillons sur un même plateau. La dispersion de la rugosité est également examinée sur différentes faces d'un échantillon et pour différentes localisations sur une même face.

### **Étude des paramètres secondaires (Chapitre 5)**

A ce stade, les paramètres définis comme optimaux lors de l'optimisation primaire sont pris comme base. Ensuite, les paramètres secondaires sont testés. Ils permettront de mieux comprendre la formation de la surface latérale et, par conséquent, d'améliorer sa rugosité. Cette étude est divisée en deux :

- Etude de l'effet d'une variable unique
  - Stratégies (sans contour)
  - Post-scanning
  - Compensation
  - Contour
- Etude de l'effet combiné de plusieurs variables
  - Compensation plus contour
  - Surface inclinées avec et sans contour

### **Modélisation numérique des surfaces latérales (Chapitre 6)**

Une nouvelle approche de modélisation des surfaces est présentée. L'essence de cette approche consiste à créer un modèle numérique dont les paramètres d'entrée sont les valeurs moyennes des rayons de courbure des cordons : rayon du début, rayon de la fin et rayon du côté. Le modèle prend en compte la position des cordons de la pièce les uns par rapport aux autres et peut donc prédire la rugosité pour différentes stratégies de fusion, paramètres de compensation.

## **2.4. Caractérisation des échantillons**

Deux caractéristiques importantes sont évaluées pour les échantillons fabriqués. Il s'agit de la topographie et de la porosité des pièces. En ce qui concerne les cordons, ils sont évalués à la fois par des observations de vue de dessus (pour vérifier la continuité du cordon) et par des observations de section transversale (pour vérifier la profondeur et la hauteur du cordon). Les principes des différents moyens de caractérisation utilisés, ainsi que les étapes de la préparation des échantillons, sont décrits ci-dessous.

## 2.4.1. Moyens d'analyse des porosités

### 2.4.1.1. Méthode d'Archimède

La méthode d'Archimède évalue la porosité volumique des échantillons. Elle est rapide et non destructive.

La méthode est basée sur le principe d'Archimède, selon lequel tout corps placé dans un fluide (liquide ou gaz) est soumis à une poussée verticale dirigée de bas en haut égale au poids du volume de fluide déplacé. Par conséquent, les échantillons dont la porosité doit être calculée sont pesés successivement dans l'air puis dans l'eau distillée de densité connue. L'instrument utilisé pour cette méthode est une balance analytique AB104-S/Fact<sup>6</sup> (Figure 2.9).



Figure 2.9 – Principe de la mesure de la porosité par pesées successives d'un échantillon dans l'air puis dans l'eau, basé sur la méthode d'Archimède

Avant la mesure, pour obtenir des résultats plus précis, les échantillons doivent être dégazés à l'aide d'une pompe à vide.

En appliquant le principe de poussée d'Archimède, il est possible de calculer la masse volumique absolue de l'échantillon:

$$\rho_{absolue} = \frac{m_{air}}{(m_{air} - m_{immergée})} \cdot \rho_{eau} \quad (13)$$

où  $\rho_{absolue}$ ,  $g/cm^3$  – masse volumique absolue;

$m_{air}$ ,  $g$  – masse de l'échantillon pesé dans l'air;

$m_{immergée}$ ,  $g$  – masse de l'échantillon pesé dans l'eau

$\rho_{eau}$ ,  $g/cm^3$  – masse volumique de l'eau distillée

Ensuite, la densité de l'échantillon ( $\rho_{relative}$ ,  $g/cm^3$ ) peut être déterminée comme le rapport de la masse volumique absolue ( $\rho_{absolue}$ ,  $g/cm^3$ ) par la masse volumique théorique ( $\rho_{théorique}$ ,  $g/cm^3$ ):

$$\rho_{relative}(\%) = \frac{\rho_{absolue}}{\rho_{théorique}} \cdot 100 \quad (14)$$

où  $\rho_{théorique} = 2.67 g/cm^3$  pour un alliage d'aluminium.

<sup>6</sup> Mettler Toledo, Switzerland. <https://www.mt.com>

Le niveau de porosité peut enfin être calculé et correspond à l'équation (15):

$$Porosité(\%) = 100 - \rho_{relative}(\%) \quad (15)$$

### 2.4.1.2. Microscope optique

La deuxième méthode d'estimation de la porosité des échantillons utilisée dans cette étude est l'analyse d'images obtenues au microscope optique. Elle est réalisée à l'aide d'un microscope optique ZEISS Axio Scope A1<sup>7</sup>. Par ailleurs, la microstructure du matériau fusionnée et la continuité des cordons sont également évalués avec ce microscope.

Dans un premier temps, les échantillons (mono-cordons ou cubes) sélectionnés sont découpés dans le plan XY et YZ (coupe transversale) par une tronçonneuse de précision. La direction Z est la direction de construction (Figure 2.10). Les échantillons sont ensuite enrobés à chaud dans une résine acrylique avec une enrobeuse SimpliMet 4000<sup>8</sup> et, par la suite, polis mécaniquement.

Dans un second temps, 9 images sont prises à un grossissement de 5× à intervalles réguliers de 1mm pour évaluer la porosité.

Les images obtenues sont ensuite analysées grâce à un code développé sur le logiciel MATLAB R2018b (version 9.5)<sup>9</sup>. La porosité est déterminée comme le rapport entre la surface des pores détectés et la surface totale de l'image.

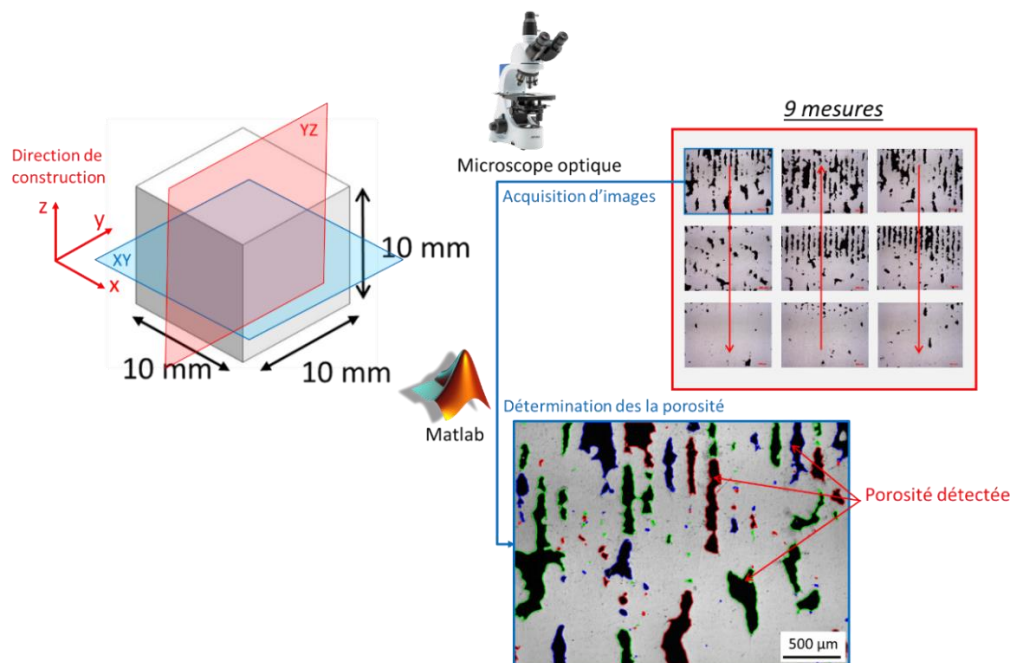


Figure 2.10 – Principe de la mesure de la porosité des échantillons par analyse d'image

L'analyse d'images est une méthode visuelle pour déterminer la porosité (par exemple permet d'obtenir la forme et la localisation de la porosité dans la pièce), mais contrairement à la méthode d'Archimède, elle prend plus de temps et nécessite la destruction des échantillons étudiés.

<sup>7</sup> ZEISS, Allemagne. <https://www.zeiss.com>

<sup>8</sup> BUEHLER, Suisse. <https://www.buehler.com>

<sup>9</sup> MATLAB, France. <https://www.mathworks.com>

En revanche, la méthode d'Archimède peut donner des résultats faussés lors de la mesure d'échantillons à forte porosité. Malgré cela, la comparaison des deux méthodes montre des résultats globaux similaires (la moyenne de cinq mesures a été choisie pour la comparaison) (figure 2.11).

La Figure 2.11 et le Tableau 2.4 illustrent l'influence de la densité d'énergie sur la porosité de six échantillons mesurés par ces deux méthodes.

Tableau 2.4 – Les valeurs de porosité pour six échantillons obtenues par la méthode d'Archimède et par l'analyse d'images

Porosité, % (moyenne de 5 mesure)	Numéro des échantillons					
	1	2	3	4	5	6
Méthode d'Archimède	6.3	0.2	0.2	0.1	0.7	0.1
Analyse d'images	12.4	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1

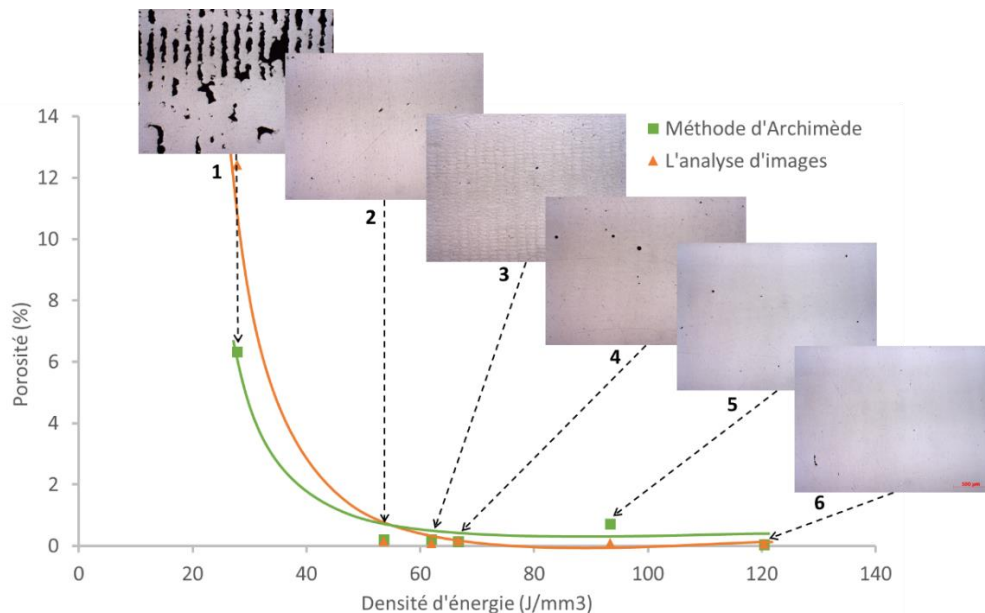


Figure 2.11 – Comparaison des valeurs de porosité obtenues par la méthode d'Archimède et par analyse d'images en fonction de la densité d'énergie volumique (VED)

## 2.4.2. Moyens d'analyse de la topographie des surfaces

### 2.4.2.1. Microscope à variation focale

La topographie des surfaces des cubes et les dimensions des cordons sont déterminées grâce à un microscope à variation de focus (Infinitefocus G5<sup>10</sup>). Il s'agit d'un système de mesure optique qui utilise la technique de variation de focalisation pour générer un profil 3D des surfaces avec un faisceau de lumière blanche. Cette méthode est précise, rapide et flexible. Elle est donc bien adaptée pour mesurer les surfaces 3D

<sup>10</sup> Alicona Imaging GmbH, Autriche. <http://www.alicon.com>

créées en fabrication additive. La Figure 2.12 illustre le principe de cette technique de mesure.

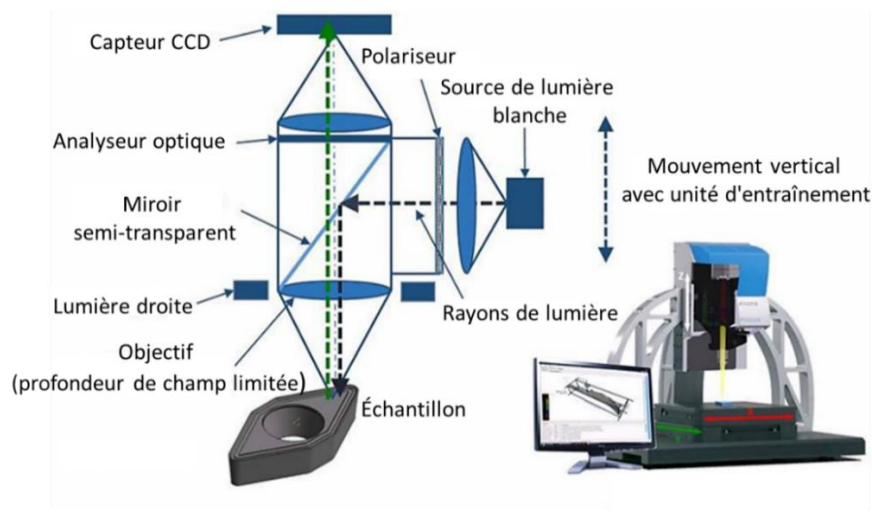


Figure 2.12 – Schéma du principe de fonctionnement d'un microscope à variation focale

Un microscope à variation focale comprend un système optique avec une profondeur de champ limitée pour l'identification de la mise au point, une source de lumière, un capteur de dispositif à transfert de charges (CCD) et un mécanisme d'entraînement. La lumière de la source est transmise à travers le séparateur de faisceau – miroir semi-transparent sur l'objectif et l'échantillon. Les irrégularités de la surface diffusent la lumière dans différentes directions qui sont partiellement captées par l'objectif et transmises au capteur CCD. Le mouvement vertical de la source de lumière par rapport à l'objectif fait varier le degré de mise au point de la surface de l'échantillon et ce changement de mise au point provoque le changement de contraste dans le capteur CCD. En analysant le contrat sur le capteur CCD, il est possible de reconstruire les informations de hauteur de la surface à inspecter. Le principe de mesure permet de capturer des surfaces contenant des caractéristiques avec des angles d'inclinaison différents.

Dans le cadre de l'analyse de cette étude une résolution latérale de 2  $\mu\text{m}$  et une résolution verticale de 50 nm (à grossissement 20 $\times$ ) sont sélectionnés pour l'acquisition des topographies des surfaces supérieures et latérales (Tableau 2.5). La zone mesurée pour chaque échantillon est de 3 mm par 2 mm (Figure 2.13 – Vue du dispositif de mesure de topographies de surface).

Tableau 2.5 – Les paramètres d'acquisition de la topographie de surface par le microscope à variation de focus

Grossissement	Résolution latérale	Résolution verticale	Aire mesurée	Surfaces mesurées
20 $\times$	2 $\mu\text{m}$	50 nm	3mm $\times$ 2mm	Surface supérieure (Haut) Surface latérale (Face) Fin du cordon



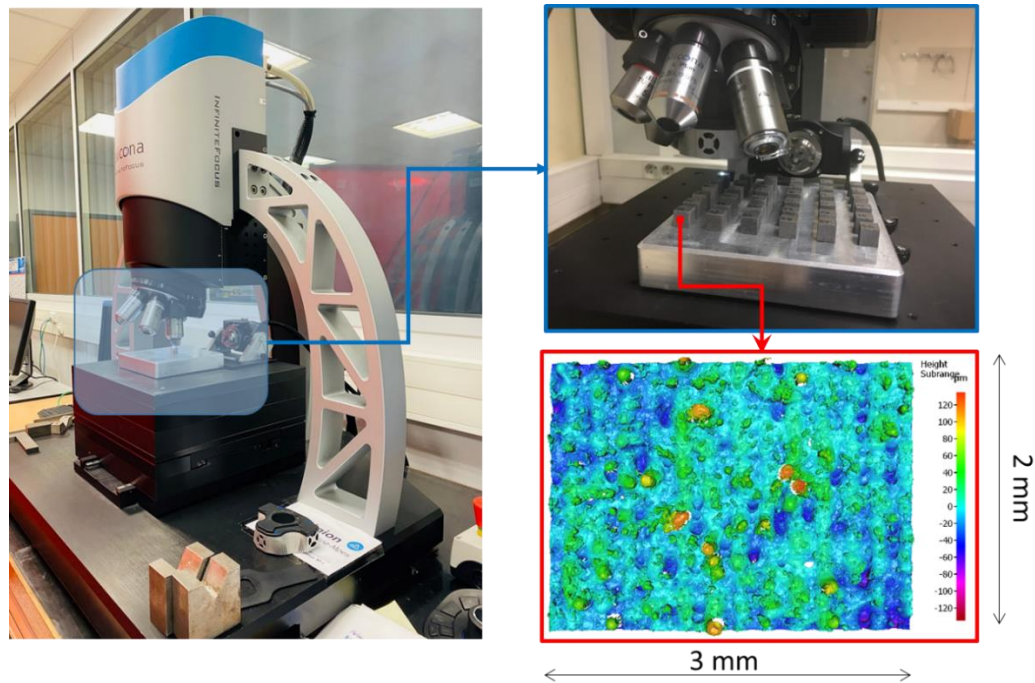


Figure 2.13 – Vue du dispositif de mesure de topographies de surface

#### 2.4.2.2. Microscope électronique à balayage (MEB)

Un microscope électronique à balayage (MEB) TESCAN Vega II SBH<sup>11</sup> est utilisé pour des observations qualitatives des surfaces. Ce microscope est basé sur le principe de l'interaction électrons-matière, capable de produire des images à très fort grossissement. Pendant le fonctionnement du microscope, le faisceau d'électrons balaye la surface de l'échantillon qui, en réponse, réémet divers signaux: les électrons secondaires, les électrons rétrodiffusés et les rayons X (Figure 2.14). Les deux premiers sont utilisés pour l'imagerie et les derniers pour l'analyse de la matière.

Les images obtenues avec le MEB ont un relief expressif. Cette technique a la particularité d'offrir une très grande profondeur de champ (plusieurs centaines de microns). Ainsi, elle permet une meilleure visualisation et évaluation de l'état des surfaces FA.

Le MEB fonctionne dans un vide ordinaire. Une préparation simple des échantillons permettant d'observer directement les surfaces est réalisée. Les images sont prises à un grossissement de 100× avec une taille mesurée standard de 2.02 mm par 2.02 mm.

Le MEB est également utilisé pour déterminer la forme et la taille des particules de poudre.

<sup>11</sup> TESCAN, République tchèque. <http://www.tescan.com>



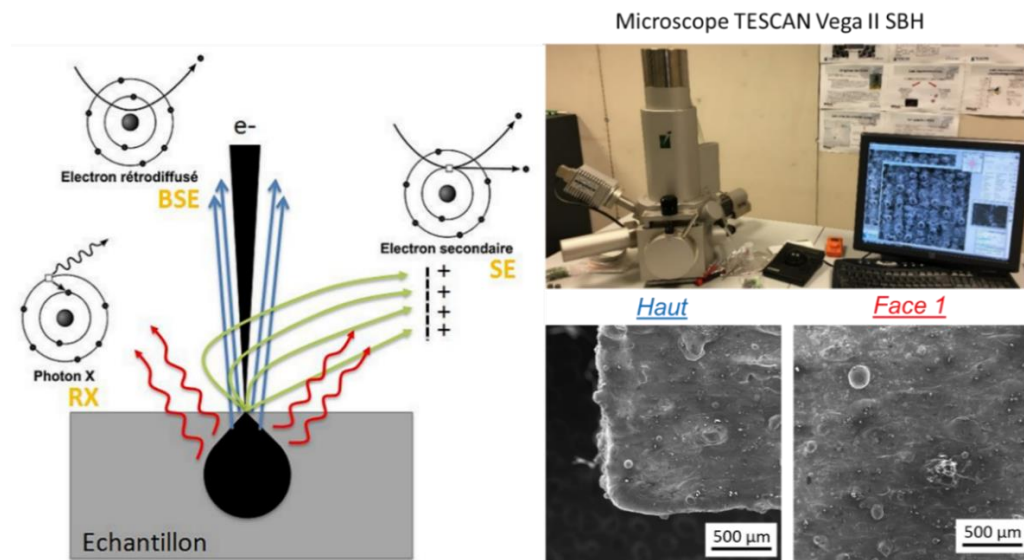


Figure 2.14 – Gauche: une représentation schématique du principe de l'interaction électron-matériau; Droit: le microscope TESCAN Vega II SBH et les images produites.

### 2.4.2.3. Prétraitement et post-traitement des topographies acquises

Un prétraitement de la topographie de surface extraite est effectué après acquisition (Figure 2.15). Une de suppression de forme (polynôme d'ordre 2) est appliquée. Aucun autre filtre (du type Gaussien) n'est utilisé dans le cadre de cette thèse. L'analyse de la rugosité est donc effectuée sur la surface primaire. Cela s'explique par le fait que les normes existantes pour les valeurs de filtration ont été élaborées pour la production conventionnelle. Par conséquent, l'utilisation de ces filtres peut conduire à des conclusions fausses (peut-être sous-estimées) sur le niveau de rugosité. Le paramètre surfacique  $S_a$  est utilisé pour caractériser la rugosité de surface primaire. C'est le paramètre le plus utilisé dans la littérature (90% [27]), qui donne une idée générale de l'état de la surface analysée.

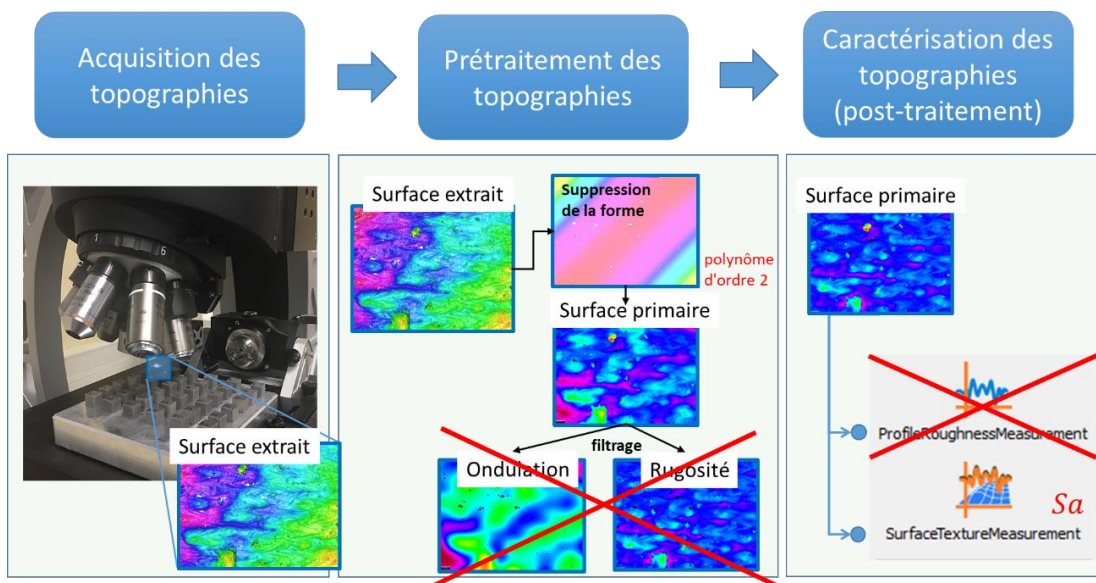


Figure 2.15 – Étapes de l'analyse de la topographie de surface dans le cadre de cette thèse

---

# *Chapitre 3 : Influence des paramètres primaires sur la rugosité latérale et la densité des pièces*

---

## *Sommaire*

---

<b>3.1. Première campagne de tests à faible puissance</b> .....	94
3.1.1. Tentative de création de cordons stables .....	95
3.1.2. Tentative de création de pièces volumiques.....	97
3.1.3. Conclusion .....	101
<b>3.2. Deuxième campagne de tests à puissance élevée</b> .....	102
3.2.1. Recherche de la fenêtre de paramètres pour l'optimisation du procédé LPBF à l'échelle du cordon.....	102
3.2.2. Recherche de la fenêtre de paramètres pour l'optimisation du procédé LPBF à l'échelle du cube .....	104
3.2.3. Conclusion .....	110

---

Atteindre la meilleure rugosité de surface peut être difficile pendant le procédé de fusion laser sur lit de poudre, car il s'agit d'un procédé interdépendant qui peut, en même temps, nuire à d'autres propriétés, telles que la porosité. Cependant, la densité de la pièce (et donc le niveau de porosité) est l'une des propriétés les plus importantes à optimiser car elle a une influence directe sur les performances mécaniques et physiques de la pièce.

Par conséquent, ce chapitre est dédié à la compréhension de l'influence des paramètres de base du procédé LPBF sur les propriétés des pièces finales, notamment la densité et la rugosité des surfaces générées. Une attention particulière est portée à l'étude de l'effet de la densité d'énergie (linéaire et volumique) car la densité d'énergie est un facteur important de dosage des différents paramètres de fabrication. Il permet donc d'orienter le bon choix des paramètres primaires pour produire des pièces de haute densité avec un état de surface satisfaisant et qui montrent de bonnes performances mécaniques.

Deux campagnes d'expériences sont considérées :

- (1) En utilisant une faible puissance de 100W;
- (2) En utilisant les puissances supérieures à 100W.

A chaque campagne, la maîtrise du procédé LPBF se résume à l'optimisation de la fusion d'un lit de poudre au niveau d'un seul cordon. Ensuite, l'optimisation volumique est effectuée au niveau d'un seul cube. Cette approche permet de mieux comprendre les phénomènes qui se produisent pendant l'interaction laser-matériau et de sélectionner la fenêtre de procédé correcte qui est optimale pour la rugosité et la densité.

### **3.1. Première campagne de tests à faible puissance**

La puissance du faisceau laser est la principale source d'énergie nécessaire à la fusion de la poudre. Plus la valeur de la puissance est élevée, plus l'énergie sera transférée à la poudre et des températures plus élevées seront atteintes dans le bain de fusion. Les conditions de fusion de la poudre dépendent des propriétés de son matériau, en particulier de sa conductivité thermique et de sa réflectivité. Ainsi, la détermination de la puissance suffisante pour produire des pièces de qualité est liée au matériau de départ.

Dans la littérature, la plupart des sources résument que les alliages d'aluminium nécessitent plus de puissance laser en raison de leur faible absorption et de leur conductivité élevée [37, 45, 56]. Il existe une fenêtre de paramètres de base pour la poudre d'AlSi10Mg avec une distribution de particules de 15-45  $\mu\text{m}$  selon laquelle des cordons stables sont formés lorsque la puissance du laser est supérieure à 170 W [45] (partie supérieure de la Figure 3.1).

En revanche, Aboulkhair et al. ont obtenu des échantillons d'une densité de  $99,8 \pm 0,08$  % à une puissance laser de 100 W (partie inférieure de la Figure 3.1). La vitesse de balayage est de 500 mm/s, l'écart vecteur est de 50  $\mu\text{m}$  et l'épaisseur de la couche est de 40  $\mu\text{m}$ .

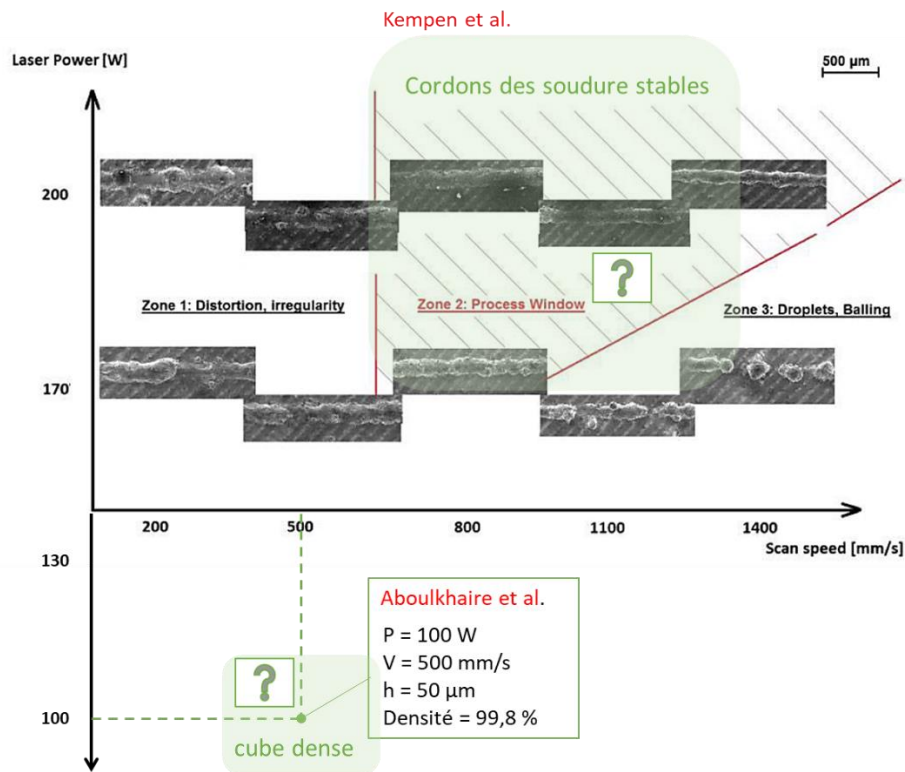


Figure 3.1 – Différentes fenêtres de paramètres de procédé utilisées dans la littérature pour lesquelles des cordons stables et des pièces denses sont obtenues

Comme les études se déroulent dans le cadre du projet 3D Hybride, la première campagne d'expériences est menée dans des conditions de faible puissance. L'objectif est d'établir une fenêtre de paramètres de procédé à une puissance laser fixe de 100 W.

#### 3.1.1. Tentative de création de cordons stables

La première étape pour comprendre les interactions laser-matériau consiste à créer des seuls cordons. Un cordon monocouche fournit des informations sur la formation et la stabilité du bain de fusion, en fonction de la puissance et de la vitesse de balayage du laser. L'analyse d'un seul cordon permet de mieux comprendre les différents phénomènes qui se produisent lors de l'interaction entre le faisceau laser et le lit de poudre. Un cordon est également le composant principal des pièces LPBF et est responsable de la qualité des surfaces formées.

L'analyse des cordons formés est généralement effectuée sur la base de certaines exigences pour le bain de fusion [45]. Ces exigences permettent de déterminer facilement le zone dans lequel le procédé fonctionne normalement.

Selon ces exigences, un cordon doit :

- Être continu, pour éviter des porosités et des irrégularités de la pièce;
- Pénétrer légèrement la couche précédente, afin d'obtenir une bonne connexion entre les couches suivantes (bon mouillage de la couche en dessous);
- Avoir une hauteur suffisante (environ la moitié de la largeur de la piste), afin de pouvoir constituer des pièces en trois dimensions;

- Avoir un angle de connexion avec la couche précédente proche de 90 ° afin d'assurer une bonne précision dimensionnelle et une densité élevée.

A ce stade de l'étude, la puissance du laser est fixée à 100 W et la vitesse de balayage varie de 200 à 1000 mm/s (Tableau 3.1). Les cordons sont formés sur le plateau en une couche avec une densité d'énergie linéaire différente. Comme indiqué précédemment, LED ( $E_L, J/mm$ ) est définie comme le rapport entre la puissance du laser et la vitesse de balayage (voir équation (2), Chapitre 1). La géométrie des cordons est observée en microscopie optique (Figure 3.2).

Tableau 3.1 – Paramètres du procédé sélectionnés pour la formation des cordons monocouche à une puissance fixe de 100 W

Paramètres	Valeurs
Puissance de laser, $P$ (W)	100 (valeur constant)
Vitesse de balayage, $V$ (mm/s)	200, 300, 500, 600, 700, 800, 900, 1000
Densité d'énergie linéaire, $LED$ J/mm	0.5, 0.33, 0.2, 0.17, 0.14, 0.12, 0.11, 0.1

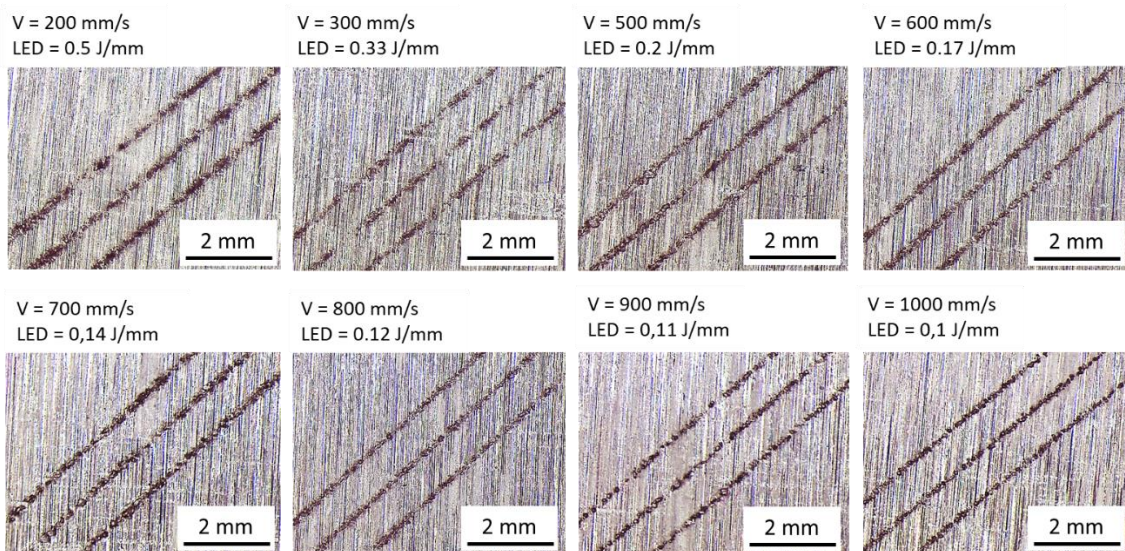


Figure 3.2 – Vue de dessus des cordons monocouches avec différentes valeurs de LED

Les résultats montrent l'instabilité du bain de fusion à 100 W. Tous les cordons ont une structure irrégulière et discontinue avec un effet balling prononcé. Ils ne répondent à aucune des exigences ci-dessus. De plus, l'état des cordons de balayage dépendait directement de l'homogénéité du lit de poudre, puisqu'ils étaient réalisés sur le plateau sans utilisation de support. En effet, les premières couches de poudre adhèrent au plateau de construction et ne sont donc pas toujours homogènes.

Il est possible de conclure que la puissance de 100 W n'est pas suffisante pour former des cordons stables lorsque l'on travaille avec des alliages d'aluminium.



### 3.1.2. Tentative de création de pièces volumiques

Bien que la puissance de 100 W ne soit pas suffisante pour obtenir des cordons stables, il a été décidé de choisir une fenêtre de paramètres pour tenter de construire des cubes avec des dimensions de 10x10x10 mm.

Pour la construction de cubes, des valeurs plus faibles de la vitesse de balayage sont sélectionnées (voir Tableau 3.2). Cela augmente le temps d'interaction entre le lit de poudre et le faisceau laser et, par conséquent, la quantité d'énergie transmise au matériau (LED). Dans ce cas, la valeur de puissance est restée constante et égale à 100 W.

Les valeurs d'écart vecteur sont également définies et égales à 60, 80 et 100  $\mu\text{m}$ . L'épaisseur de la couche est constante à 30  $\mu\text{m}$  (voir l'explication à la section 2.1, Chapitre 2). Ces paramètres définissent ensemble la densité volumique (VED). La VED est calculée selon équation (3) (Chapitre 1).

Tableau 3.2 – Paramètres du procédé sélectionnés pour la construction de cubes à une puissance fixe de 100 W

Paramètres	Valeurs
Puissance de laser, $P$ (W)	100 (valeur constant)
Vitesse de balayage, $V$ (mm/s)	100, 125, 150, 200, 300
Ecart vecteur, $E_v$ ( $\mu\text{m}$ )	60, 80, 100
Densité d'énergie volumique, $VED$ J/ $\text{mm}^3$	333.3, 277.8, 266.7, 222.2, 166.7, 111.1

Le procédé de construction des cubes a pris la forme d'un frittage plutôt que d'une fusion. Il y a des difficultés à fixer les premières couches sur le plateau. Cela a provoqué une production instable et certains cubes n'ont pas été construits ou ont été détachés du plateau en cours de construction (Figure 3.3).

L'analyse visuelle des cubes frittés montre la présence d'un grand nombre de défauts, tels que particules non fondues, ruptures intercouches, porosités, etc. (Figure 3.3).

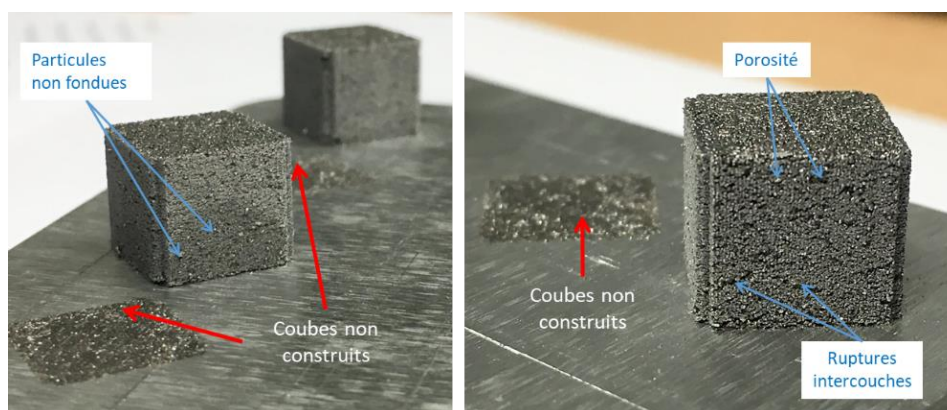


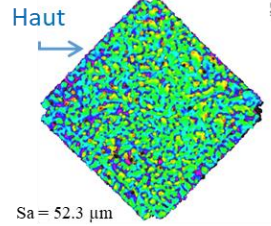
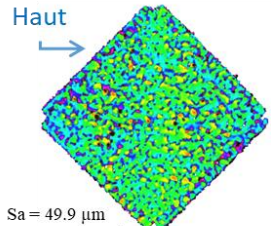
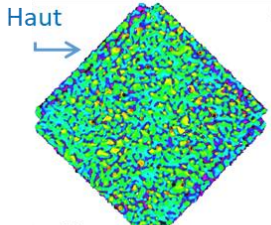
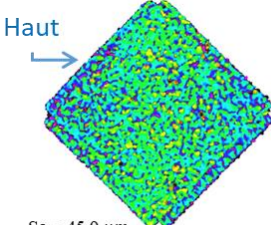
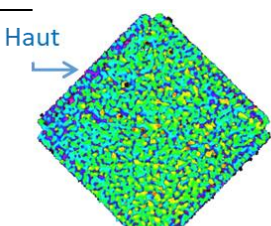
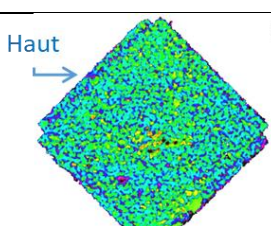
Figure 3.3 – Cubes construits avec une puissance de 100 W

Les études de rugosité de surface (supérieure et latérale) et de porosité suivent le protocole décrit au Chapitre 2.

### Chapitre 3. Influence des paramètres primaires sur la rugosité latérale et la densité

Les résultats sont présentés comme suit: Tableau 3.3 – rugosité de la surface supérieure; Tableau 3.4 – rugosité de surface latérale; Tableau 3.5 – porosité. Sur le côté gauche des tableaux, les vitesses de balayage utilisées sont présentées, dans la partie supérieure se trouvent les écarts vecteurs. Les fenêtres de paramètres entraînant un arrêt de production sont marquées en rouge.

Tableau 3.3 – Topographie des surfaces supérieures des cubes construits à une puissance constante de 100 W

		Ecart vecteur, $\mu\text{m}$		
		60	80	100
Vitesse de balayage, mm/s	100	Arrêt de production		
	125	Arrêt de production	 <p>Sa = 52.3 <math>\mu\text{m}</math> VED = 333.3 J/mm<sup>3</sup></p>	 <p>Sa = 49.9 <math>\mu\text{m}</math> VED = 266.7 J/mm<sup>3</sup></p>
	150	Arrêt de production	 <p>Sa = 50 <math>\mu\text{m}</math> VED = 277.8 J/mm<sup>3</sup></p>	 <p>Sa = 45.9 <math>\mu\text{m}</math> VED = 222.2 J/mm<sup>3</sup></p>
	200	Non contrôlé	Non contrôlé	 <p>Sa = 46.8 <math>\mu\text{m}</math> VED = 166.7 J/mm<sup>3</sup></p>
	300	Non contrôlé	Non contrôlé	 <p>Sa = 40.6 <math>\mu\text{m}</math> VED = 111.1 J/mm<sup>3</sup></p>
		Arrêt de production	Arrêt de production	Arrêt de production

### 3.1. Première campagne de tests à faible puissance

Tableau 3.4 – Topographie des surfaces latérales des cubes construits à une puissance constante de 100 W

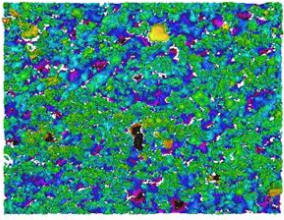
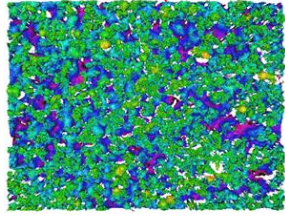
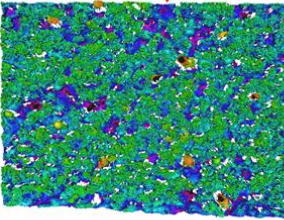
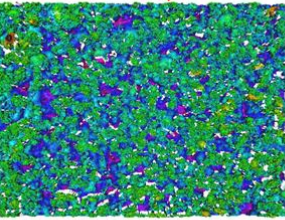
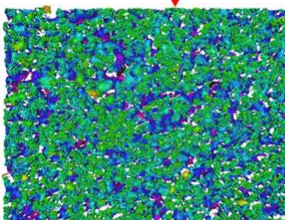
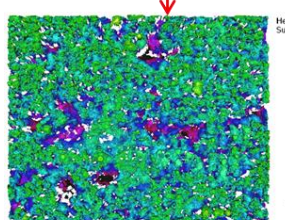
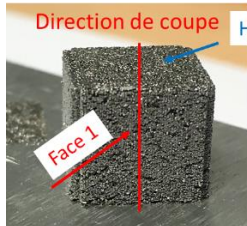
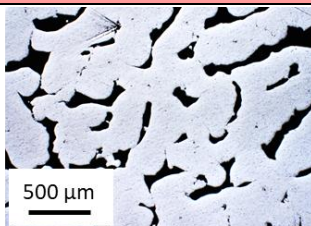
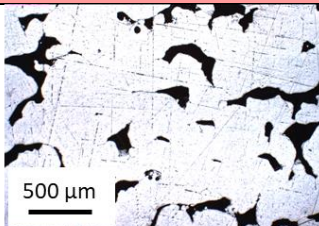
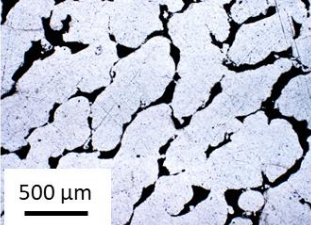
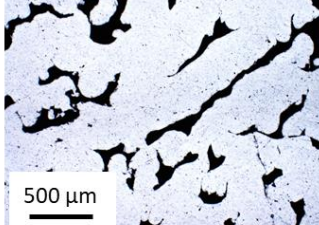
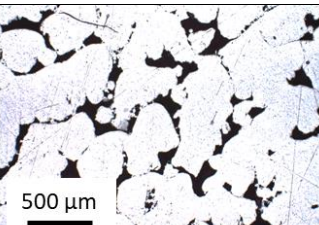
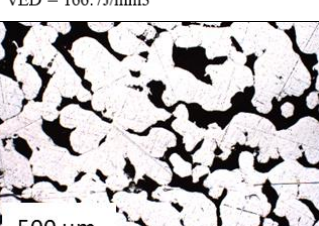
		Ecart vecteur, $\mu\text{m}$		
		60	80	100
Vitesse de balayage, mm/s	100	Arrêt de production		
	125	Arrêt de production	Face 1  Sa = 46.9 $\mu\text{m}$ VED = 333.3 J/mm3	Face 1  Sa = 46.7 $\mu\text{m}$ VED = 266.7 J/mm3
	150		Face 1  Sa = 41.5 $\mu\text{m}$ VED = 277.8 J/mm3	Face 1  Sa = 41.4 $\mu\text{m}$ VED = 222.2 J/mm3
	200		Non contrôlé	Face 1  Sa = 40.8 $\mu\text{m}$ VED = 166.7 J/mm3
	300		Non contrôlé	Face 1  Sa = 38.7 $\mu\text{m}$ VED = 111.1 J/mm3



Tableau 3.5 – Images au microscope optique des porosités des cubes construits à une puissance constante de 100 W

		Ecart vecteur, $\mu\text{m}$		
		60	80	100
Vitesse de balayage, mm/s	100	Arrêt de production	Arrêt de production	
	125		 Porosité = 17.6% VED = 333.3 J/mm <sup>3</sup>	 Porosité = 13.7 % VED = 266.7 J/mm <sup>3</sup>
	150		 Porosité = 16% VED = 277.8 J/mm <sup>3</sup>	 Porosité = 15.4 % VED = 222.2 J/mm <sup>3</sup>
	200		Non contrôlé	 Porosité = 14.3 % VED = 166.7J/mm <sup>3</sup>
	300		Non contrôlé	 Porosité = 26.8 % VED = 111.1 J/mm <sup>3</sup>

L'analyse de la surface supérieure montre que l'état de surface est extrêmement rugueux. En moyenne, la rugosité arithmétique  $S_a$  est de  $47,6 \pm 4,1 \mu\text{m}$ , ce qui dépasse largement l'épaisseur de la couche ( $30 \mu\text{m}$ ). Le rouleau racle la surface des cubes pendant la production. En conséquence, le matériau peut se décoller ou le rouleau peut

se bloquer, ce qui arrête la production. La rugosité de la surface latérale est également élevée et se rapproche de  $50 \mu\text{m}$ . Cela est causé par la déformation du bain de fusion et l'effet balling.

L'analyse des échantillons et de leur densité Tableau 3.5 montre un niveau de porosité élevé ( $17,3 \pm 4,8\%$ ) qui confirme le frittage.

#### 3.1.3. Conclusion

Les résultats obtenus permettent de conclure que:

- Une puissance de 100W n'est pas suffisante pour faire fondre la poudre d'aluminium et obtenir des cordons stables. En conséquence, les cubes produits sont frittés et craquelés, ce qui conduit à des valeurs élevées de rugosité et de porosité.
- A ce stade, il est difficile de dire quelque chose sur la relation entre les valeurs de porosité et de rugosité, ainsi que sur l'influence de la densité d'énergie sur celles-ci.
- Il est nécessaire d'augmenter la puissance laser et élargir la fenêtre de production à 200 voire 300 W (Figure 3.4).

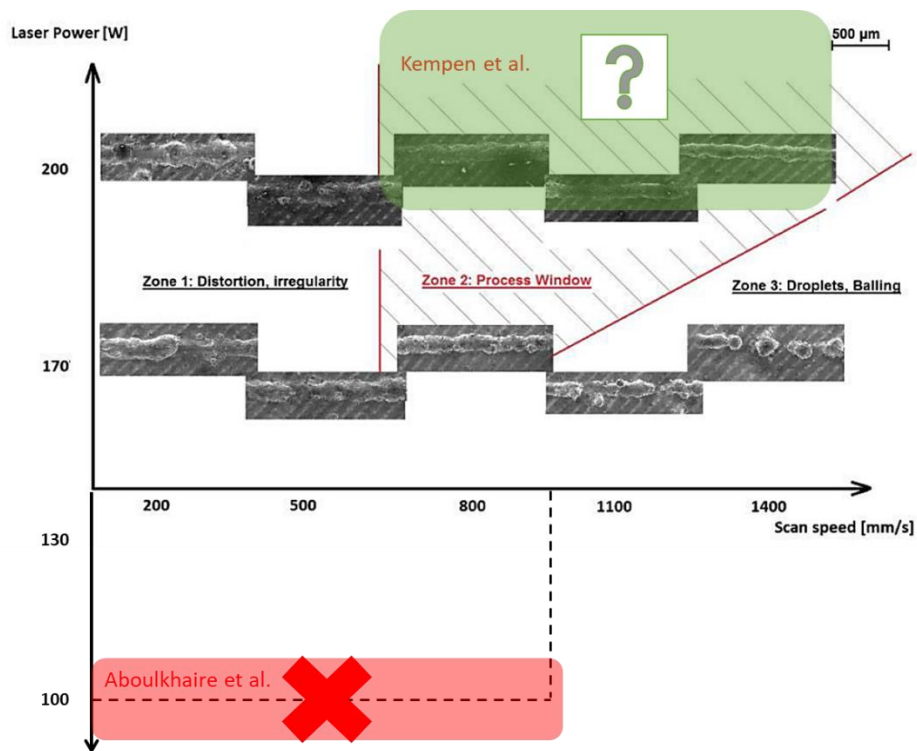


Figure 3.4 – Différentes fenêtres de paramètres de procédé utilisées dans la littérature et récapitulatif des fenêtres testées

### 3.2. Deuxième campagne de tests à puissance élevée

#### 3.2.1. Recherche de la fenêtre de paramètres pour l'optimisation du procédé LPBF à l'échelle du cordon

Vingt-quatre cordons sont produits avec des valeurs de puissance augmentées (voir Tableau 3.6). La puissance laser  $P$  varie de 200 W à 300 W, et la vitesse de balayage  $V$  de 800 mm/s à 1400 mm/s. L'épaisseur de poudre  $d$  déposée sur le plateau de construction reste à 30  $\mu\text{m}$ .

Tableau 3.6 – Paramètres du procédé primaires sélectionnés pour l'optimisation LED

Paramètres	Valeurs
Puissance de laser, $P$ (W)	200, 220, 240, 260, 280, 300
Vitesse de balayage, $V$ (mm/s)	800, 1000, 1200, 1400

Cette fois, les cordons sont réalisés sur un support pour obtenir une distribution homogène de la couche de poudre. Les paramètres standard des machines établis pour les alliages d'aluminium sont utilisés pour la production du support.

Par conséquent, les cordons créés dans cette étude ont été évalués à la fois par des observations en vue de dessus (pour vérifier la continuité de cordons) et des observations en coupe transversale (pour vérifier la profondeur et la hauteur de cordons) par microscopie optique.

L'analyse des cordons est présentée en fonction de la densité d'énergie linéaire (LED). La Figure 3.5 montre l'influence de différentes valeurs de LED sur la forme des cordons observée en vue de dessus et en sections transversales.

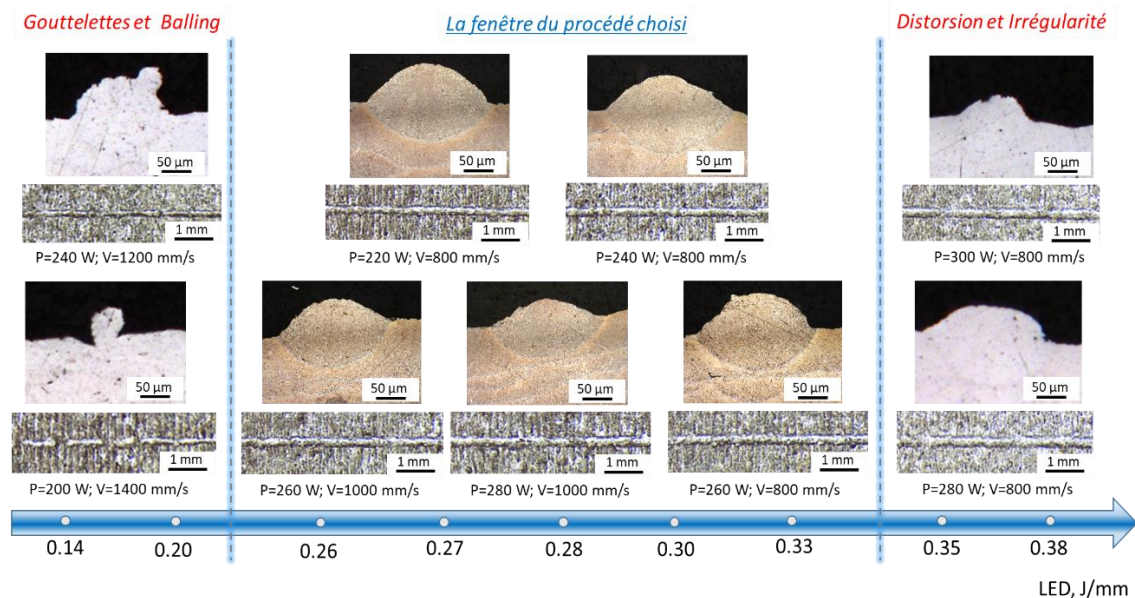


Figure 3.5 – Coupes transversales et vue de dessus de cordons avec différentes valeurs de LED

La partie droite de la figure représente les cordons produits avec une LED élevée (forte puissance et faible vitesse de balayage). Comme observé, une LED trop élevée augmente le volume du bain de fusion et diminue la viscosité du fait de la durée d'interaction plus longue entre le faisceau laser et la poudre [40]. Dans ce cas, l'hydrodynamique de la fusion devient plus important (effet Marangoni), conduisant à des distorsions et irrégularités, comme mentionné par Pei et al [40] et Kempen et al [46]. De plus, la section transversale des cordons montre une pénétration très profonde dans les couches précédentes. Une évaporation partielle peut se produire aux valeurs LED élevées [40, 43, 46]. Par conséquent, une énergie excessive a tendance à produire des cordons irréguliers et déformés [61].

Cependant, une LED trop faible (faible puissance et vitesse de balayage élevée) a tendance à générer des gouttelettes et un effet de balling (côté gauche de la figure 3.5). En augmentant la vitesse de balayage, la largeur du bain de fusion augmente alors que sa longueur diminue [40, 43, 46]. Le bain de fusion avec un rapport circonférence/longueur plus petit montre un comportement instable et se divise alors en gouttelettes pour atteindre une forme d'équilibre (instabilité de Plateau-Rayleigh) [46]. De plus, le matériau absorbe moins d'énergie et un faible mouillage avec le substrat peut se produire augmentant la création de gouttelettes. Enfin, les coupes transversales montrent une connexion insuffisante du cordon avec la couche précédente [40].

En conséquence, sur la base des observations de la trajectoire de cordon en vue de dessus et en coupe transversale, une fenêtre optimale de paramètres primaires est choisie pour des valeurs LED entre 0.26 et 0.33 J/mm (milieu de la Figure 3.5). A ce niveau, des cordons réguliers et stables sont obtenus.

Cette fenêtre diffère des valeurs rapportées dans la littérature (0.15-0.25 J/mm) [46] (voire la Figure 3.6). Cependant, ces résultats sont obtenus pour des distributions de taille de poudre différentes (15-45  $\mu\text{m}$ ). Par conséquent, l'obtention d'une LED plus élevée, dans notre étude, peut être due au fait qu'une poudre plus fine est utilisée. En effet, les poudres fines sont plus affectées par la force de cohésion et ont une plus faible coulabilité [50-51].

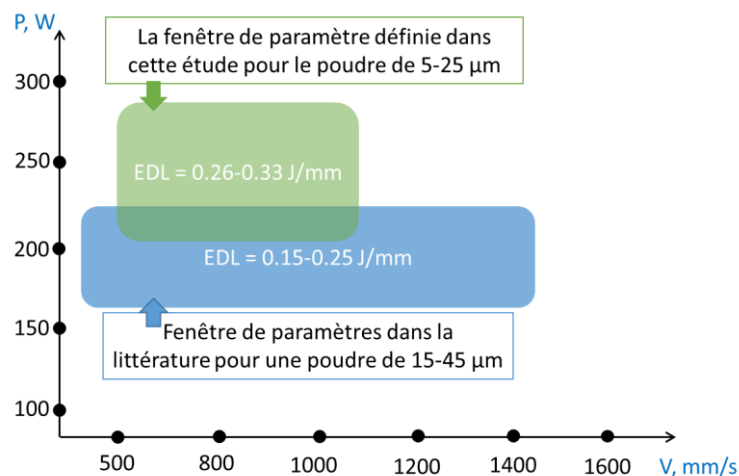


Figure 3.6 – Comparaison des fenêtres optimales de paramètres LED pour une poudre d'aluminium de granulométrie 15-45  $\mu\text{m}$  (littérature) avec une poudre d'aluminium de granulométrie 5-25  $\mu\text{m}$  (résultats expérimentaux de l'étude)

Une faible coulabilité ne permet pas la création d'une couche de poudre uniforme d'épaisseur constante [50]. Cela crée une absorption inégale du faisceau laser dans la zone de fusion [50-51, 55]. Il est donc raisonnable de supposer que, pour fondre, les poudres plus petites nécessitent une LED plus élevée.

### 3.2.2. Recherche de la fenêtre de paramètres pour l'optimisation du procédé LPBF à l'échelle du cube

Après avoir déterminé la fenêtre de paramètres LED, l'énergie volumique (VED) est calculée (défini à la section 2.2 de Chapitre 2). Plusieurs écarts vecteurs sont donc sélectionnés (voir Tableau 3.7). Les principales valeurs de LED sont choisies dans la fenêtre des paramètres optimaux. Comme mentionné à la section 2.3, l'épaisseur de la couche est constante et égale à 30  $\mu\text{m}$ .

Tableau 3.7 – Paramètres de procédé pour l'optimisation VED

Paramètres	Valeurs	Puissance, $P$ (W)	Vitesse de balayage, $V$ (mm/s)	Écarte vecteur, $E_v$ ( $\mu\text{m}$ )
LED 1, (J/mm)	0.26	260	1000	90, 100, 115, 120, 130, 140, et 180
LED 2, (J/mm)	0.27	220	800	
LED 3, (J/mm)	0.28	280	1000	
LED 4, (J/mm)	0.30	240	800	
LED 5, (J/mm)	0.30	300	1000	
LED 6, (J/mm)	0.33	260	800	

L'analyse des résultats est ensuite étudiée en deux phases d'expériences. La première phase des expériences est menée au début de l'étude – 2018, et la seconde à la fin – 2020.

La première analyse de 2018 consiste à rechercher une fenêtre de paramètres VED dans laquelle la densité et la rugosité (supérieure et latérale) des surfaces tendent vers une valeur minimale. Une analyse complémentaire en 2020 est réalisée pour vérifier la reproductibilité des résultats obtenus précédemment (en 2018).

#### **Analyse 2018**

Quarante-deux échantillons avec différents VED sont construits pendant la première analyse (voir Figure 3.7). En outre, quatre échantillons situés en dehors de la fenêtre LED sélectionnée sont produits pour confirmer les résultats de l'optimisation LED (produit sur une autre plateau).



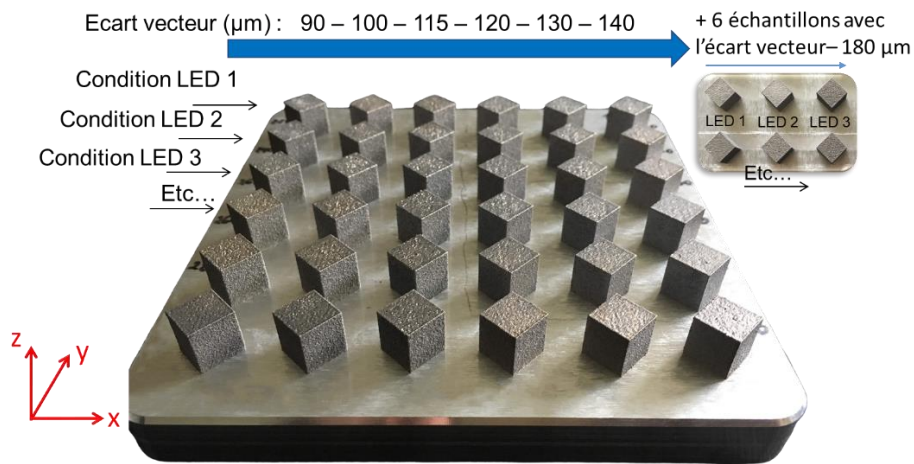


Figure 3.7 – Plateau d'échantillons produits avec des paramètres de LED sélectionnés et des écarts vecteur variables

A ce stade de l'étude, les valeurs de rugosité obtenues sur la Figure 3.7 ne présentent pas de dispersions. Cependant celles-ci existent à cause par exemple de productions à différents emplacements sur le plateau (instabilités de la caustique du laser et des écoulements de gaz) [44]. Le chapitre 4 est dédié à l'étude des dispersions des valeurs de rugosité. Néanmoins, les tendances discutées dans cette section, qui relie la rugosité de surface au VED, sont significatives.

Les principaux effets du VED sur les rugosités de surface supérieure (haut) et latérale (face 1) et les niveaux de porosité sont illustrés à la Figure 3.8. Selon cette figure, la porosité et la rugosité moyenne surfacique  $S_a$  (pour les surfaces supérieure et latérale) présentent des tendances similaires. En effet, trois comportements distincts peuvent être observés:

- Pour les faibles valeurs de VED, la rugosité de la surface et le niveau de porosité diminuent avec l'augmentation de VED;
- Puis, à mesure que le VED continue d'augmenter, la rugosité de surface et la porosité ont atteint un optimum (valeur minimale);
- Enfin, pour des valeurs de VED élevées, une augmentation de VED entraîne une augmentation du niveau de rugosité et de porosité.

Ces tendances peuvent être expliquées comme suit : des valeurs VED faibles génèrent une fusion partielle de la poudre. Par conséquent, des niveaux élevés de porosité et de rugosité sont obtenus. Une énergie plus élevée augmente la taille de la zone fondue, permettant une meilleure fusion des lits de poudre et une meilleure mouillabilité avec les couches précédentes [42, 44, 81]. Cela favorise le lissage de la surface et la réduction du niveau de porosité [81]. Cependant, une énergie trop élevée génère des gradients de température élevés dans le bain de fusion, et la surface de l'échantillon créée devient plus chaude, attirant des particules du lit de poudre [35, 44]. Les surfaces deviennent irrégulières avec un grand nombre de particules de poudre attachées, mais le niveau de porosité change légèrement [44].

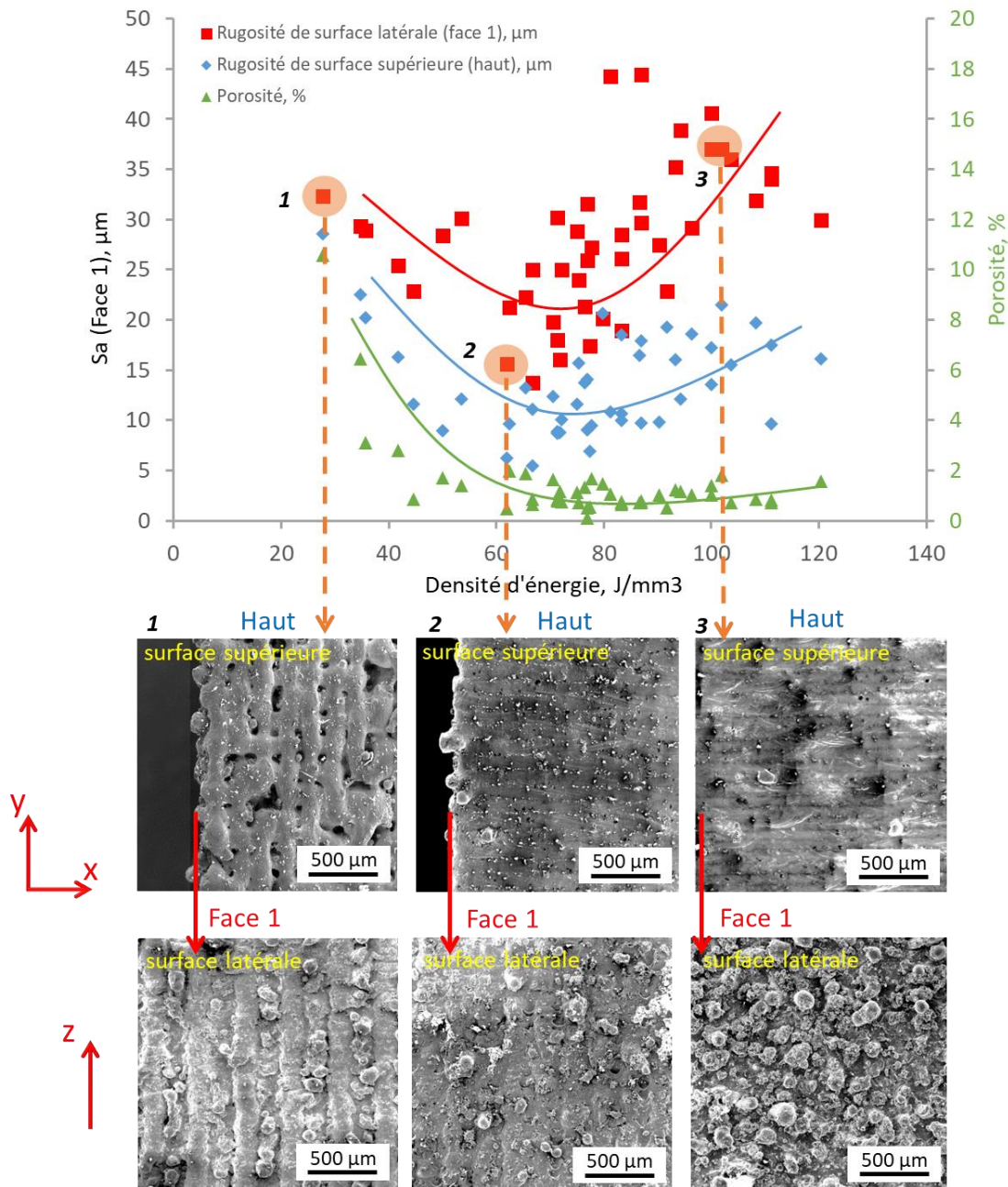


Figure 3.8 – Rugosité des surfaces et densité des pièces en fonction de la densité d'énergie volumique (VED) selon l'analyse de 2018

Cette observation est confirmée par la figure 3.8, où trois échantillons avec des valeurs de VED différentes (27.8, 61.9 et 100 J/mm<sup>3</sup>) ont été observés par MEB (bas de la figure 3.8).

Les échantillons 1 et 3 avaient une mauvaise qualité de surface. Pour le premier échantillon, il n'y a pas assez d'énergie pour faire chevaucher les espaces entre les cordons et pour faire fondre complètement la couche de poudre. De plus, les particules non fondues ont adhéré à la surface en raison d'une refonte partielle.

Pour le troisième échantillon, les surfaces sont devenues irrégulières en raison de la présence d'un grand nombre d'amas (matériau fondu et solidifié) partiellement intégrés dans la surface. Le phénomène balling s'est propagé à une énergie plus élevée en raison

de la grande différence de tension superficielle générée autour des particules fondues (causée par les gradients de température élevés) [35].

Selon cette analyse la fenêtre optimale des densités d'énergie volumique (rugosité de surface moyenne minimale et niveau de porosité minimal) varie de 60 à 85 J/mm<sup>3</sup>. Dans cette fenêtre optimale, la rugosité moyenne Sa atteint 20 µm, et la densité atteint 99,6 % (0,4 % de porosité). Compte tenu de cela, les conditions suivantes: P = 260 W, V = 1000 mm /s et h = 140 µm) avec VED 61.9 J/mm<sup>3</sup> sont choisies comme point de départ pour le reste de l'étude.

### **Analyse complémentaire 2020**

Dans l'analyse complémentaire, quatorze valeurs comprises entre 27.8 et 120.4 J/mm<sup>3</sup> (voir Tableau 3.8) sont sélectionnées parmi toutes les valeurs VED (prises en compte dans l'analyse 2018). Cela permettra de vérifier la reproductibilité des résultats obtenus précédemment et, par conséquent, la relation entre la rugosité et la densité.

Tableau 3.8 – Valeurs VED sélectionnées pour vérifier la reproductibilité des courbes de rugosité et de densité obtenues en 2018

Numéro d'échantillon	VED, J/mm <sup>3</sup> sélectionné	P, W	V, mm/s	E <sub>v</sub> , µm
1	27.8	225	1500	180
2	34.7	225	1200	180
3	44.6	225	1200	140
4	53.6	225	1000	140
5	61.9	260	1000	140
6	66.7	260	1000	130
7	66.7	280	1000	140
8	75.4	260	1000	115
9	77.8	280	1000	120
10	86.7	260	1000	100
11	93.3	280	1000	100
12	103.7	280	1000	90
13	111.1	300	1000	90
14	120.4	260	800	90

Quatorze échantillons sont produits entre autres (36 échantillons sur un plateau). Au total, trois plateaux sont fabriqués avec la même procédure et les mêmes paramètres de procédé.

Les Figure 3.9 et Figure 3.10 montrent que les tendances des valeurs de rugosité de surface supérieure et de densité en fonction VED restent les mêmes. Cela confirme les conclusions de l'analyse 2018 (ligne pointillée grise).



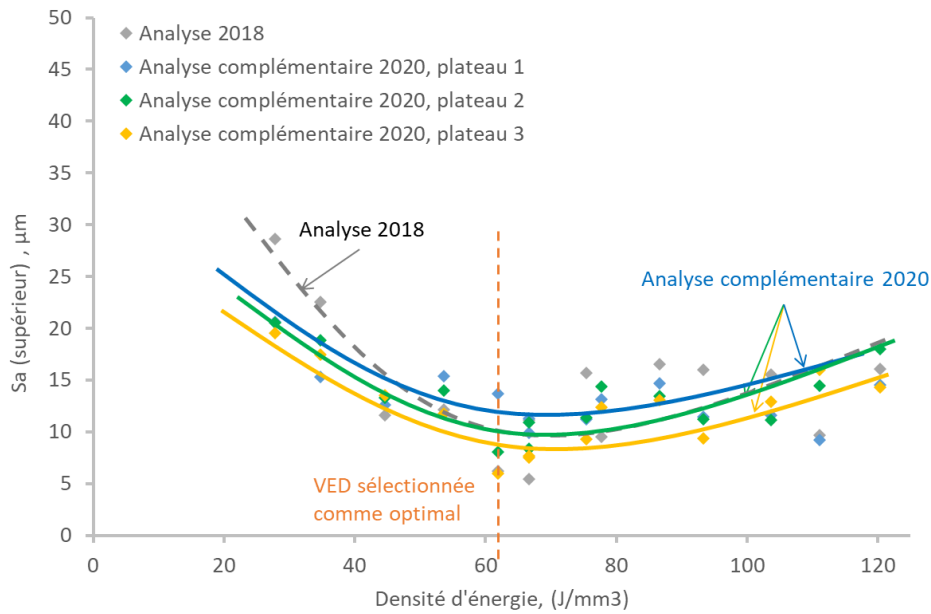


Figure 3.9 – Rugosité des surfaces supérieures en fonction de la densité d'énergie volumique (VED) selon l'analyse de 2020

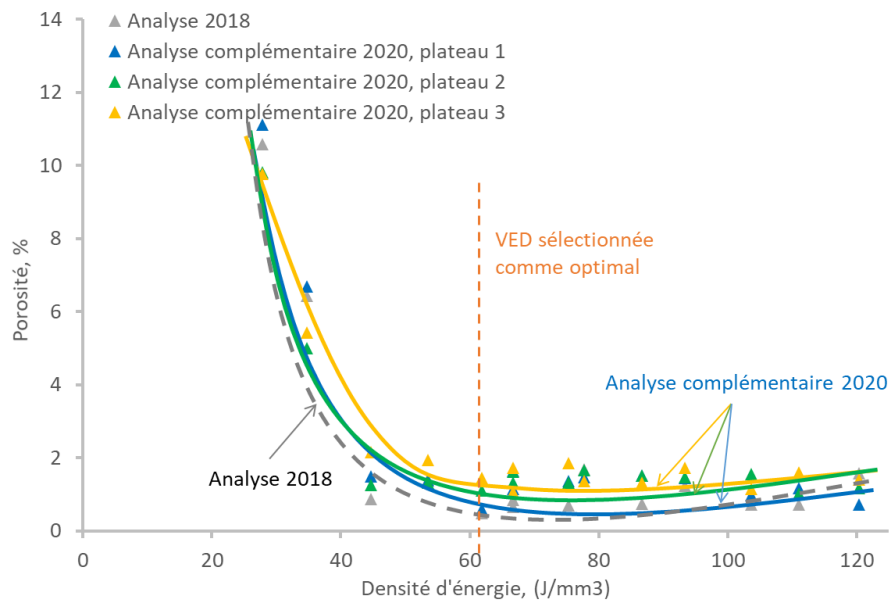


Figure 3.10 – Densité des pièces en fonction de la densité d'énergie volumique (VED) selon l'analyse de 2020

En ce qui concerne la rugosité de la surface latérale, la tendance est maintenue jusqu'à  $VED = 80 \text{ J/mm}^3$ , puis diffère (Figure 3.11). C'est-à-dire que pour la surface latérale, une augmentation de VED jusqu'à  $100\text{-}120 \text{ J/mm}^3$  entraîne une diminution du niveau de rugosité. Figure 3.12 montre la comparaison des courbes de l'analyse 2018 avec celles de 2020 (moyenne de trois plateaux) ainsi que des images d'échantillons MEB.

### 3.2. Deuxième campagne de tests à puissance élevée

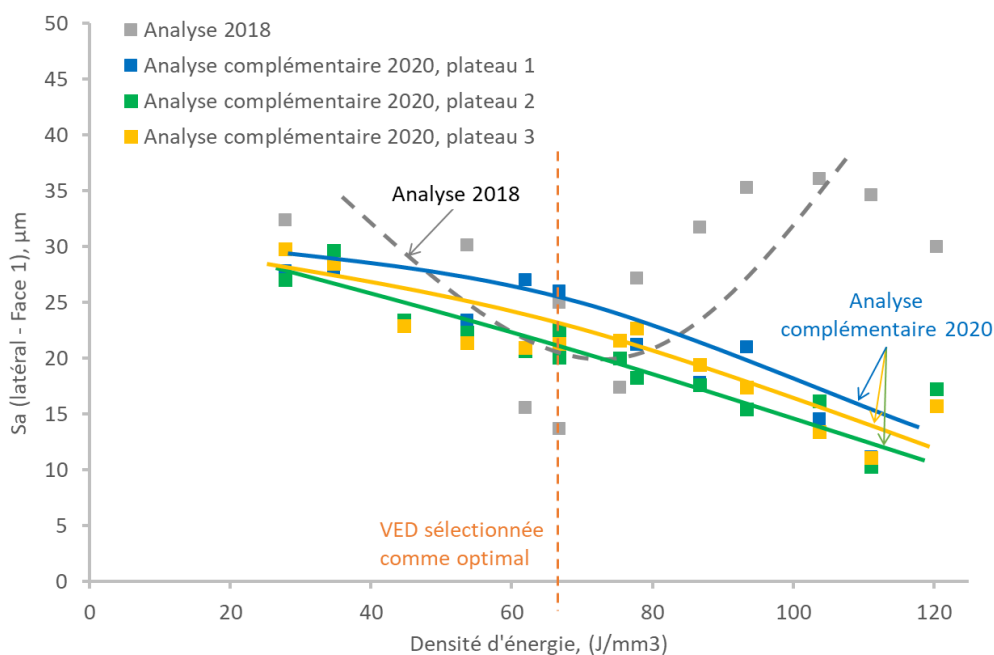


Figure 3.11 – Rugosité des surfaces latérales en fonction de la densité d'énergie volumique (VED) selon l'analyse de 2020

Pour expliquer la raison de ce changement, déterminons la macro énergie absorbée par chaque plateau. Sur chaque plateau (dans l'analyse 2018 ainsi que dans l'analyse 2020), il y a 36 échantillons de dimensions  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}$  produits avec une densité d'énergie correspondante. La quantité de chaleur que chaque plateau recevra peut alors être calculée comme suit :

$$Q = \sum V_i \cdot VED_i, J \quad (16)$$

Où  $i$  – numéro d'échantillon;  $V_i$  – volume de chaque cube,  $VED_i$  – densité énergétique appropriée.

En outre, la quantité totale de chaleur que chaque plateau reçoit peut-être déterminée. En conséquence, dans la première analyse de 2018, le plateau reçoit une quantité d'énergie de 3,1 MJ, et dans une étude complémentaire 2020, chaque plateau (1, 2 et 3) reçoit 2,3 MJ. Il est donc possible que dans le premier cas, il y ait une surchauffe du plateau étudié, ce qui pourrait affecter fortement la rugosité de la surface latérale des échantillons, en particulier ceux qui reçoivent une énergie volumique (VED) élevée.

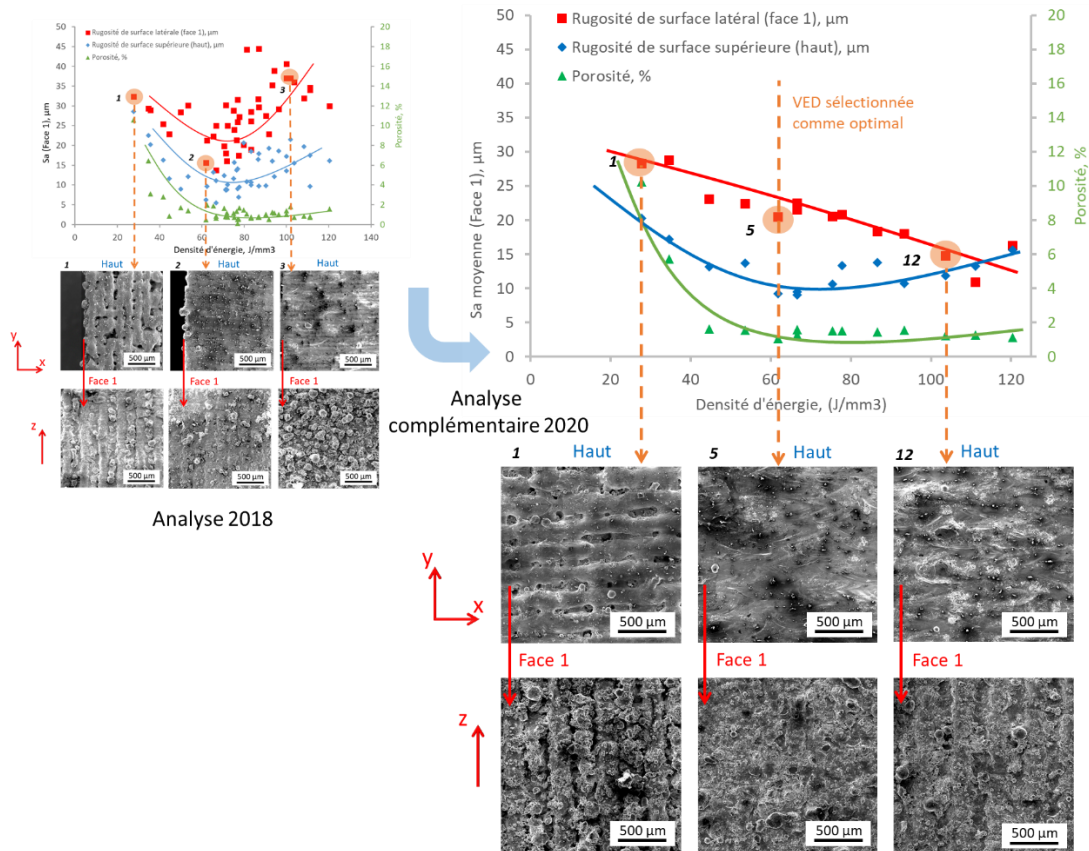


Figure 3.12 – Comparaison générale de l'analyse 2018 et de l'analyse complémentaire 2020 avec des images d'échantillons MEB

Malgré cela, il est important de noter que la rugosité de la surface supérieure et la densité des échantillons conservent la tendance initiale. Ces paramètres sont des éléments importants de l'optimisation du procédé LPBF. Par exemple, dans le cas de surfaces inclinées, le dessus et le côté de l'échantillon forment une surface combinée. Par conséquent, pour la prochaine étude, la fenêtre de paramètres et de conditions définie dans la première analyse reste applicable. La rugosité de la surface latérale, en revanche, sera optimisée par des options de procédé supplémentaires, qui seront traitées au Chapitre 5.

### 3.2.3. Conclusion

La recherche d'une fenêtre de paramètres à l'échelle du cube est réalisée en deux phases d'expériences. La première phase est menée au début de l'étude (analyse 2018), et la seconde à la fin (2020).

L'analyse 2018 montre que la densité, la rugosité de la surface supérieure et latérale ( $Sa$ ) ont suivi des tendances similaires en fonction de VED. Par conséquent, une fenêtre optimale minimisant à la fois la rugosité de surface et la porosité a pu être déterminée (VED optimale entre 60 et 85 J/mm³).

Cependant, une analyse complémentaire 2020 a montré que la rugosité de la surface latérale change sa tendance à  $VED > 80 \text{ J/mm}^3$ . Cela peut s'expliquer par le fait que dans la première analyse, la quantité de chaleur reçue par les plateaux était plus élevée que pour la deuxième analyse. Ceci a pu aggraver la rugosité latérale.

Malgré cela, il est important de noter que la rugosité de la surface supérieure et la densité des échantillons conservent la tendance initiale.

Par conséquent, les conditions suivantes:  $P = 260 \text{ W}$ ,  $V = 1000 \text{ mm /s}$  et  $h = 140 \text{ }\mu\text{m}$ ) avec  $\text{VED } 61.9 \text{ J/mm}^3$  sont applicables comme base pour le reste de l'étude.

La rugosité de la surface latérale, en revanche, sera optimisée par des options de procédé supplémentaires, qui seront traitées au Chapitre 5.



---

# *Chapitre 4 : Analyse de la dispersion de la rugosité de surface latérale*

---

## *Sommaire*

---

4.1. Reproductibilité de la rugosité sur différents plateaux.....	114
4.2. Reproductibilité de la rugosité pour différents emplacements d'échantillons sur une même plateau .....	116
4.3. Dispersion de la rugosité sur différentes faces d'un échantillon .....	117
4.4. Dispersion de la rugosité pour différents emplacements sur une face d'un échantillon.....	120
4.5. Conclusion.....	121

---

Une étape importante de cette étude consiste à examiner la dispersion de la rugosité de surface afin d'évaluer la reproductibilité du procédé LPBF. Cette étude intermédiaire (entre la première et la deuxième étape d'optimisation) permet de déterminer si les améliorations de la rugosité de surface dues à un paramètre sont significatives. L'évaluation de la dispersion de rugosité permettra également d'identifier d'autres facteurs de procédé qui sont largement négligés mais qui influencent la variabilité de la rugosité des surfaces formées.

Les dispersions et reproductibilités de rugosité lors de la production sont analysées à différentes échelles:

- Production sur différents plateaux (section 4.1)
- Différents emplacements des échantillons sur le même plateau (section 4.2)
- Différentes faces de l'échantillon caractérisées (section 4.3)
- Localisation de la surface mesurée sur une face de l'échantillon (section 4.4)

La Figure 4.1 montre les quatre différents types de dispersions étudiées séparément. Dans ce chapitre la définition de "reproductibilité de la rugosité" est utilisée pour les échantillons produits sur différents plateaux ou sur un plateau et de "dispersion de la rugosité" pour les surfaces produites sur un échantillon ou sur une face de l'échantillon.

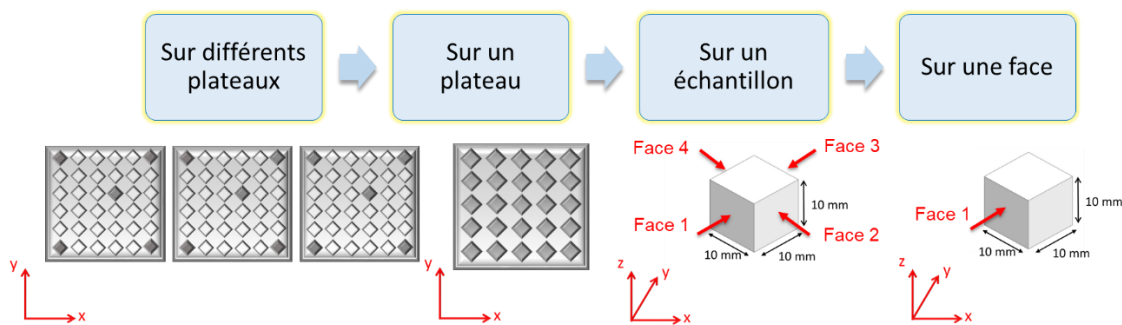


Figure 4.1 – Résumé graphique des dispersions et reproductibilités de la rugosité étudiée

L'étude est réalisée sur des échantillons obtenus dans les conditions définies au Chapitre 3 (puissance du laser: 260 W, vitesse de balayage: 1000 mm/s, écart vecteur: 140  $\mu\text{m}$ , VED = 61,9 J/mm<sup>3</sup>). De plus, comme déjà mentionné dans le Chapitre 2, pour cette étude, les échantillons sont produits de manière répétée en utilisant la même procédure et les mêmes paramètres de procédé. En outre, la Face 1 d'échantillon est toujours sélectionnée pour la mesure de la rugosité.

### 4.1. Reproductibilité de la rugosité sur différents plateaux

Tout d'abord, trois plateaux sont fabriqués pour vérifier la reproductibilité de la surface sur différents plateaux. Sur chacun de ces plateaux, parmi les différents échantillons, cinq sont produits avec les mêmes paramètres et placés aux endroits spécifiques présentés sur la Figure 4.2 : i) échantillon 1, coin inférieur gauche ; ii) échantillon 2, coin inférieur droit ; iii) échantillon 3, centre ; iv) échantillon 4, coin supérieur gauche ; et v) échantillon 5, coin supérieur droit. Au total, 36 échantillons sont

#### 4.1. Reproductibilité de la rugosité sur différents plateaux

placés sur chaque plateau. La Figure 4.2 montre également la direction de la distribution de poudre, la direction d'aspiration et la direction d'alimentation d'argon (comme indiqué au Chapitre 2).

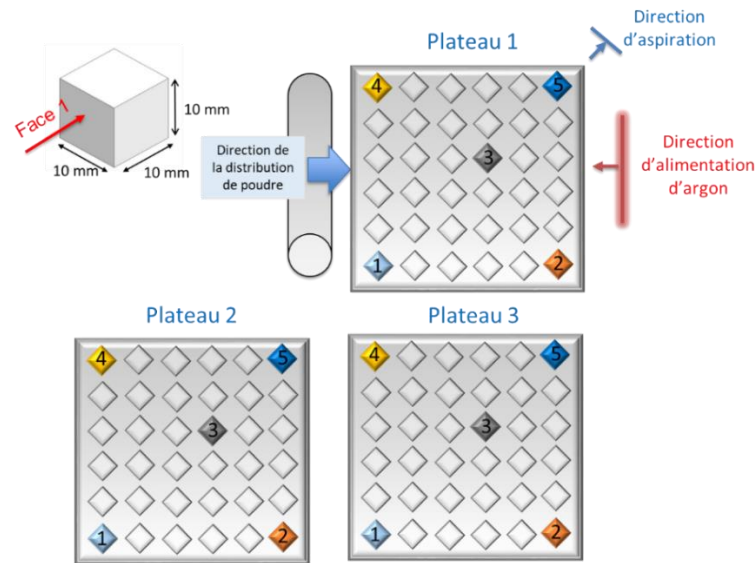


Figure 4.2 – Disposition des cinq échantillons de reproductibilité sur les plateaux

Les mesures effectuées montrent que les valeurs moyennes de rugosité varient de 24,1 à 22,2  $\mu\text{m}$  d'un plateau à l'autre (voir Figure 4.3). Dans cette figure, les barres d'erreur représentent l'écart type mesuré pour les plateaux 1 à 3, respectivement ( $\sigma = 3,75$ ,  $\sigma = 2,05$  et  $\sigma = 1,07$   $\mu\text{m}$ ). Les variations de rugosité d'un plateau à l'autre semblent donc assez faibles.

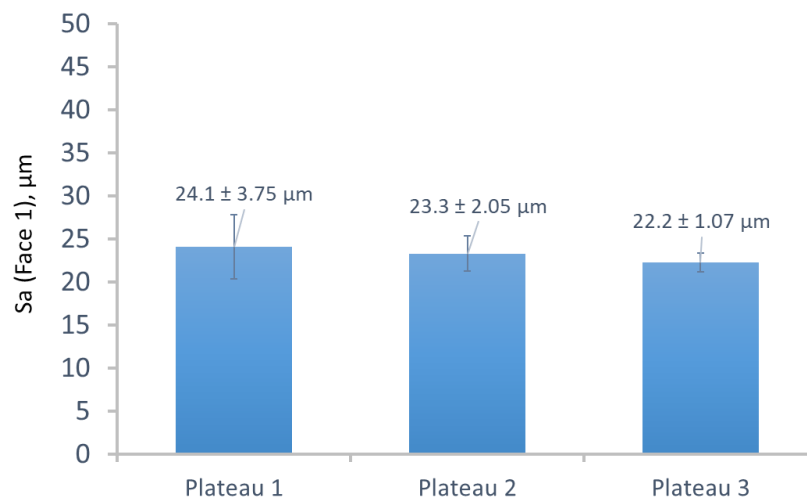


Figure 4.3 – Reproductibilité de la rugosité sur différents plateaux selon les valeurs moyenne

Cependant, la rugosité de surface varie fortement selon l'emplacement sur le plateau (Figure 4.4). Les valeurs de rugosité sont assez élevées dans les coins des plateaux et semblent plus faibles et plus stables au milieu des plateaux. Cela peut être dû à l'inhomogénéité de l'épaisseur du lit de poudre [50] et aux directions d'écoulement et d'aspiration du gaz [44].



Sa (Face 1), $\mu\text{m}$	Éch. 1	Éch. 2	Éch. 3	Éch. 4	Éch. 5	Moyenne
Plateau 1	29.5	27.0	19.7	23.6	20.6	24.1
Plateau 2	26	25.4	21	22.3	21.6	23.3
Plateau 3	22.5	22.8	20.7	21.4	23.7	22.2
$\Delta$	7	4,2	1	2,2	3,1	1,9

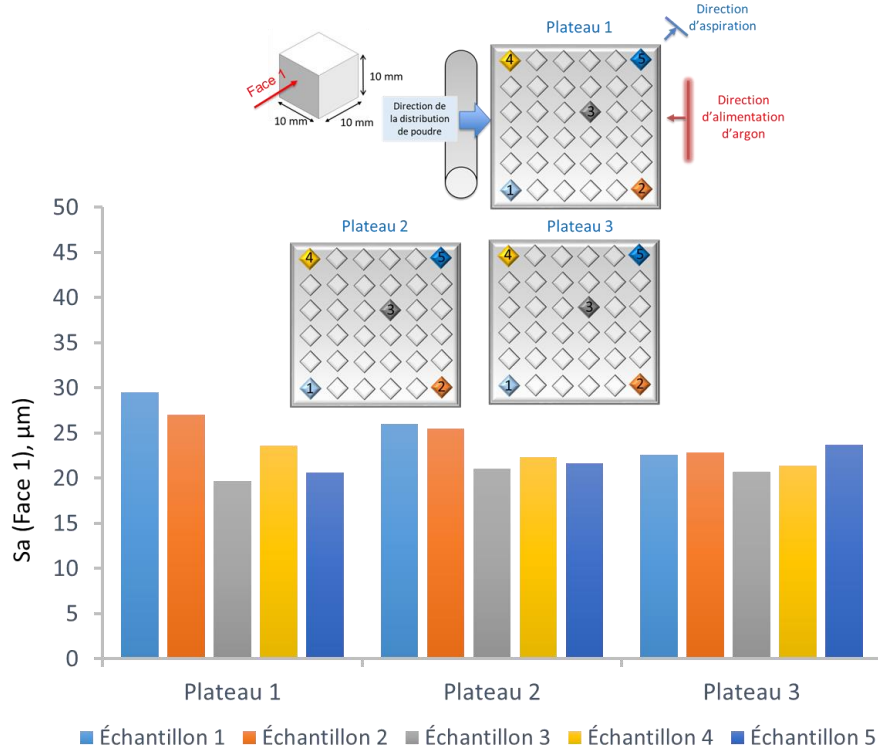


Figure 4.4 – Reproductibilité de la rugosité sur différents plateaux selon l'emplacement sur le plateau

## 4.2. Reproductibilité de la rugosité pour différents emplacements d'échantillons sur une même plateau

Pour cette analyse, 25 échantillons sont réalisés à différents endroits sur un même plateau pour un meilleur suivi des variations de rugosité (voir Figure 4.5).

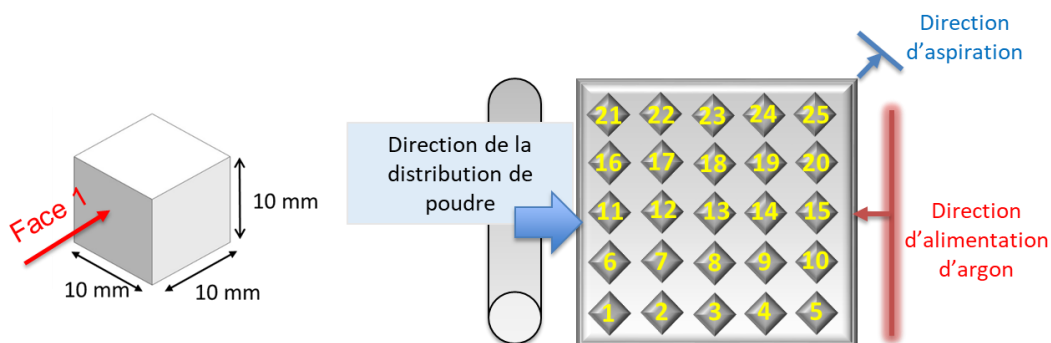


Figure 4.5 – Ordre de disposition des vingt-cinq échantillons sur un plateau

## 4.2. Reproductibilité de la rugosité pour différents sur une même plateau

La Figure 4.6 montre que la rugosité de surface est plus élevée lorsque les échantillons sont situés loin des bouches d'alimentation et d'aspiration d'argon. Par conséquent, cette étude confirme les premiers résultats de la Figure 4.4 (rugosité plus élevée en bord de plateau). Cette variation de  $S_a$  est caractérisée par un écart type  $\sigma = 1,24 \mu\text{m}$ . Dans les sections suivantes, cette valeur d'écart type est utilisée pour tracer les barres d'erreur sur les graphiques. Chaque étude présentée dans les prochains chapitres est effectuée sur le même plateau. Ainsi les variations de rugosité résultant de l'emplacement de l'échantillon sont les seules dispersions possibles. Celles-ci sont donc représentées par des barres d'erreur sur les graphiques.

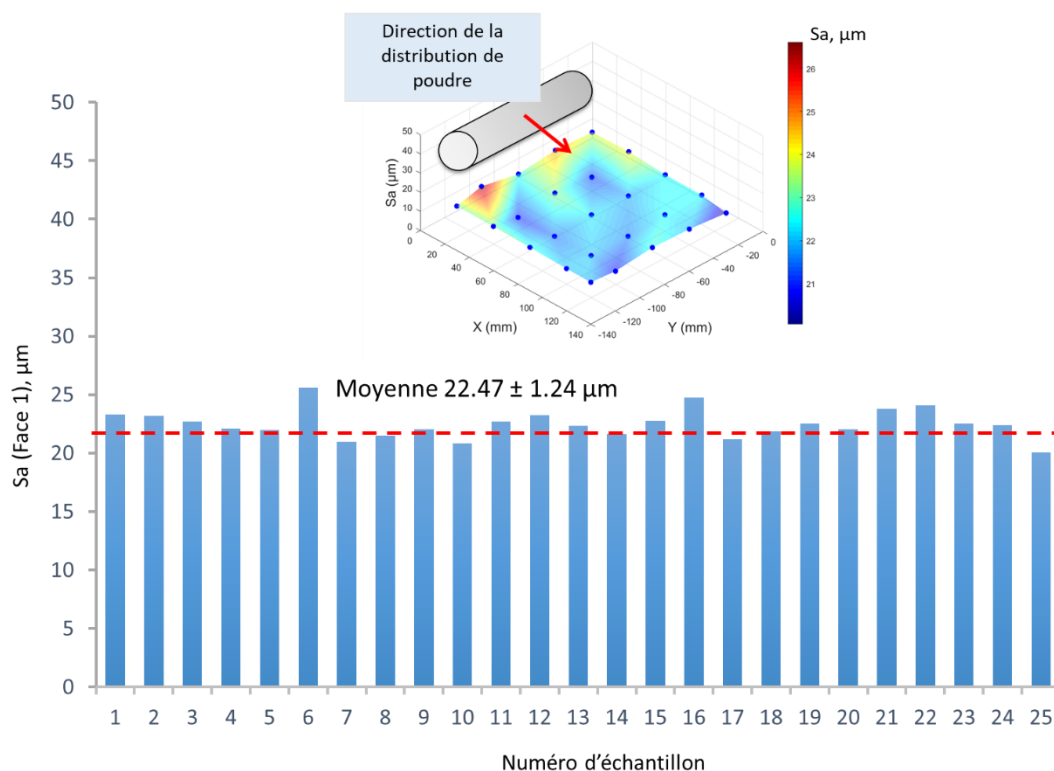


Figure 4.6 – Cartographie des valeurs de rugosité des échantillons pour différents emplacements sur le plateau de construction

## 4.3. Dispersion de la rugosité sur différentes faces d'un échantillon

En observant la rugosité du même échantillon, on constate que les états de surfaces mesurés sur les faces 1 et 2 sont significativement différents de ceux mesurés sur les faces 3 et 4 (voir la Figure 4.7). Par conséquent, une analyse MEB est effectuée pour examiner les faces 1 et 4 plus en détail (Figure 4.8). En effet, la face 1 montre la présence d'un grand nombre de particules de poudre attachées et partiellement fondues, et la face 4 montre une surface plus lisse. Probablement, la raison de ces différences est que la taille du cube ( $10 \times 10 \text{ mm}$ ) n'est pas un multiple de l'écart vecteur  $h = 140 \mu\text{m}$ .

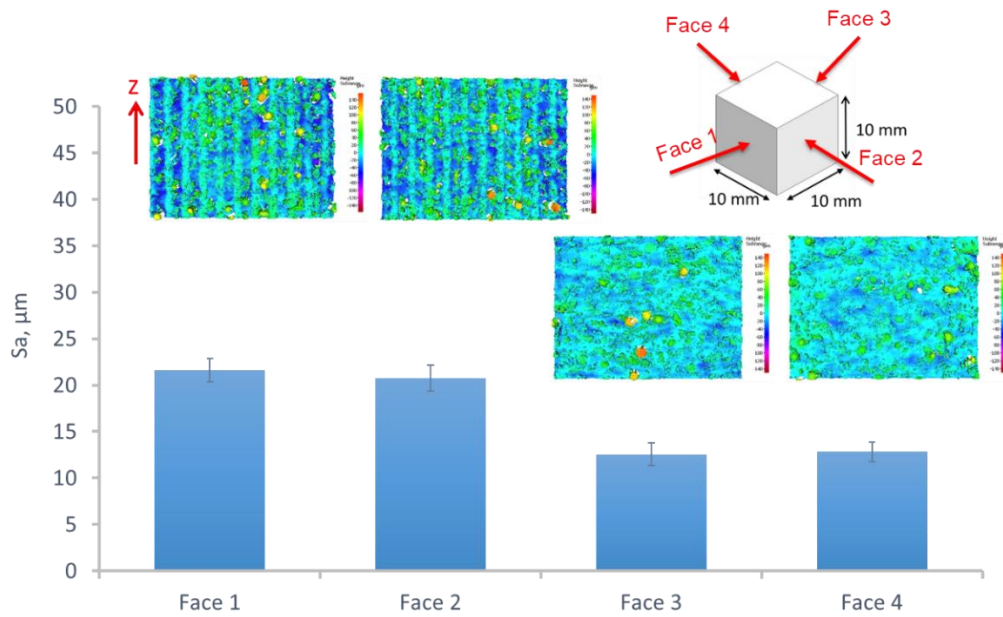


Figure 4.7 – Dispersion de la rugosité sur les différentes faces d'un cube produit

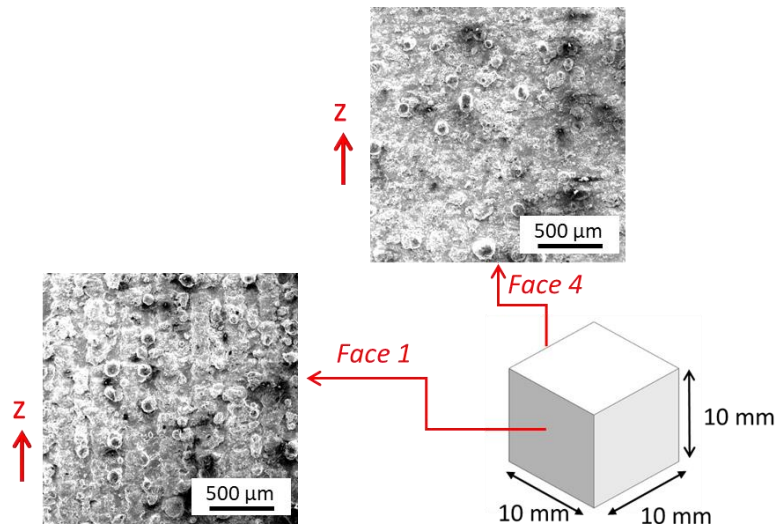


Figure 4.8 – Images MEB des faces 1 et 4

Considérons ce cas clairement. La Figure 4.9 montre la formation d'une couche paire (Figure 4.9 a), d'une couche impaire (Figure 4.9 b) et enfin d'une couche croisée (paire plus impaire, Figure 4.9 c). Dans ce cas, les lignes bleues représentent les limites réelles de l'échantillon et les lignes pointillées grises représentent les limites théoriques. Les limites de la couche théorique et réelle ne sont pas toujours coïncidentes (en bas pour la couche paire, Figure 4.9 a et à gauche pour la couche impaire, Figure 4.9 b). Ce manque de coïncidence est caractérisé par la distance indiquée par  $\Delta 1 \neq h < 140 \mu\text{m}$ , par opposition à la distance  $\Delta 2 = h = 140$ .

Par conséquent, pour les faces 1 et 2, les cordons parallèles (couches paires) à la surface finale d'intérêt sont masquées par des cordons perpendiculaires (couches impaires) à la surface finale. On peut voir sur les surfaces des faces 3 et 4 des motifs de cordons perpendiculaires (Figure 4.9 c).

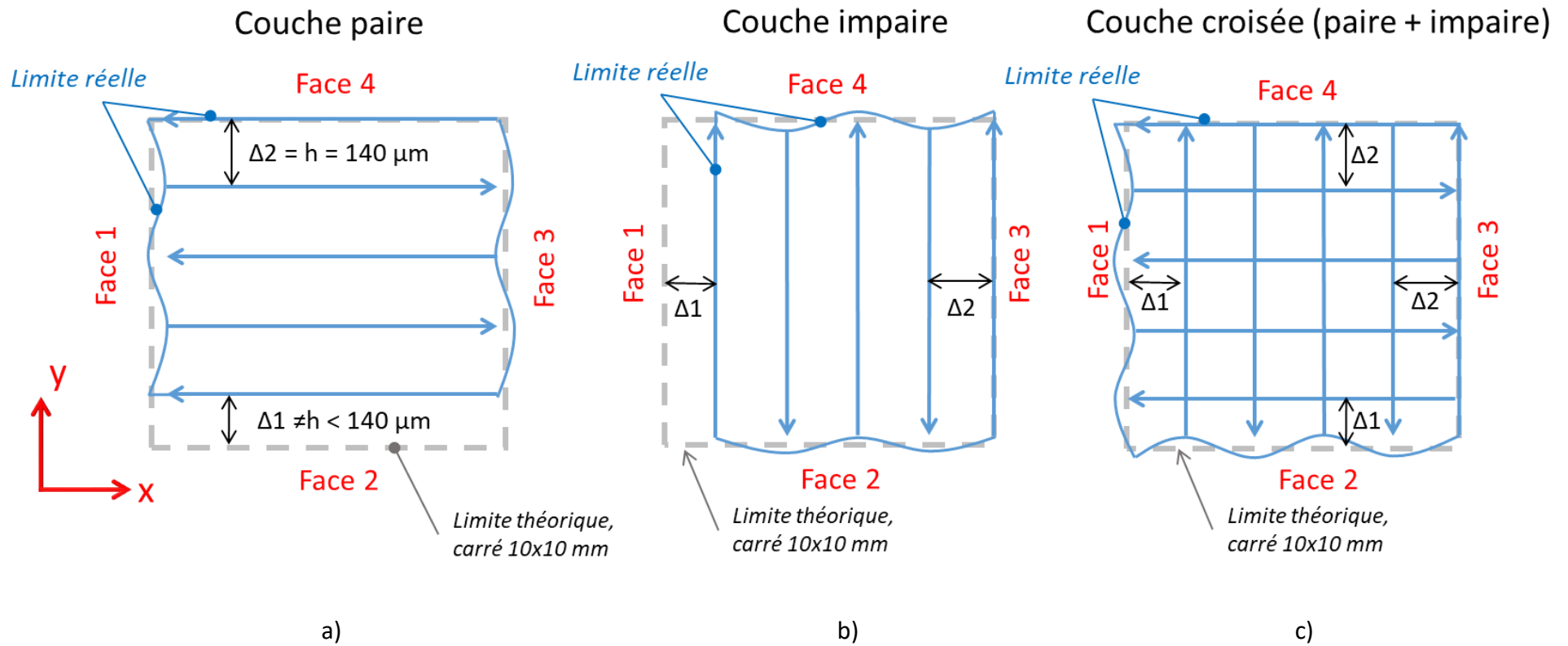


Figure 4.9 – Représentation schématique de la formation des faces en croisant des couches paires et impaires: a) couche de balayage paire ; b) couche de balayage impaire ; c) couches de balayage paires et impaires

En revanche, pour les faces 3 et 4, les cordons parallèles (couches paires) à la surface d'intérêt masquent les cordons perpendiculaires (couches impaires) à la surface d'intérêt. Par conséquent, une meilleure rugosité est obtenue (Figure 4.9 c). Plus important encore, pour le reste de l'étude, seules les surfaces face 1 ont été évaluées, ce qui signifie que les valeurs de rugosité sont particulièrement élevées. Par conséquent, la face mesurée doit toujours être mentionnée pour maintenir la cohérence des observations.

#### 4.4. Dispersion de la rugosité pour différents emplacements sur une face d'un échantillon

Neuf mesures de topographie de surface (taille : 3 × 2 mm) sont effectuées sur la face 1 (taille totale : 10 × 10 mm), ce qui signifie que toute la surface d'une face est analysée (voir Figure 4.10).

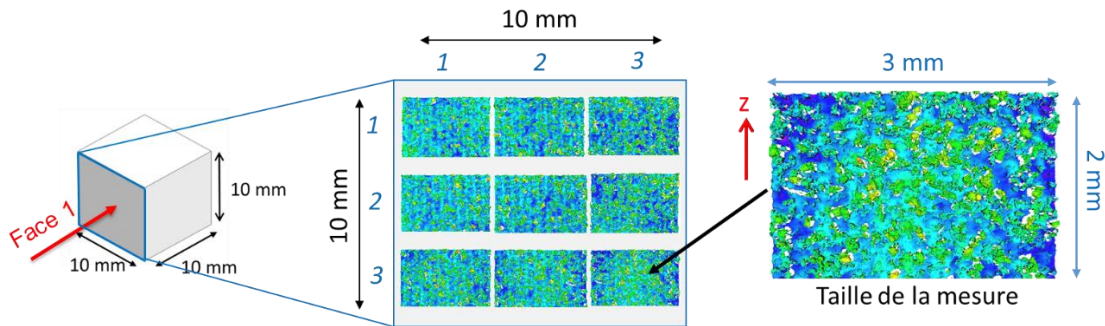


Figure 4.9 – Dispersion de la rugosité sur une face du cube produit

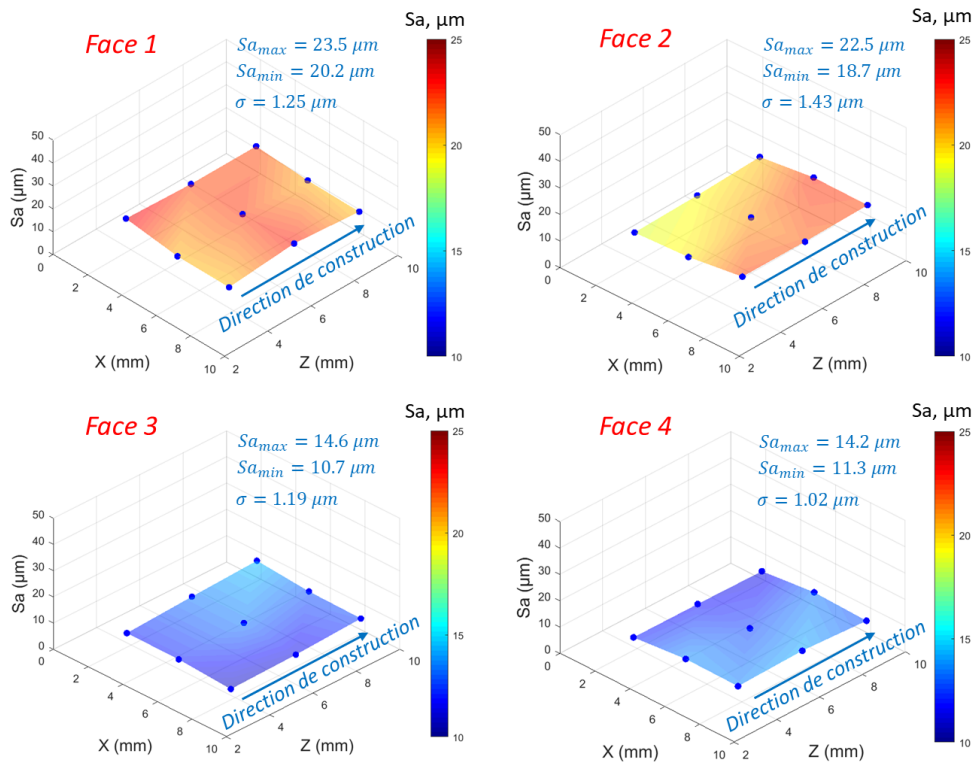


Figure 4.10 – Dispersion de la rugosité sur les quatre faces du cube

Neuf mesures de surface sont effectuées sur les autres faces de l'échantillon, et la rugosité moyenne  $S_a$  est tracée sur la Figure 4.10. Les dispersions de rugosité d'une face sont assez faibles par rapport aux dispersions d'une face à l'autre. De plus, la valeur de rugosité sur la partie centrale d'un côté est proche de la valeur moyenne des neuf mesures. En conséquence, les mesures sont prises dans la partie centrale de la face 1 pour la suite de l'étude. Cette stratégie de mesure est déjà appliquée à l'étude d'optimisation primaire du Chapitre 3.

### 4.5. Conclusion

Des résultats importants concernant la caractérisation de la rugosité des surfaces issues du procédé LPBF sont obtenus et sont résumés ci-dessous. Quelques recommandations de caractérisation et d'acquisition sont également données :

- Les variations de rugosité d'un plateau à l'autre peuvent être assez faibles mais dépendent fortement de l'emplacement sur le plateau : élevées dans les coins des plateaux (variation jusqu'à  $7 \mu\text{m}$  du  $S_a$ ) et beaucoup plus faibles au milieu des plateaux (variation de  $1 \mu\text{m}$  du  $S_a$ );
- Cependant, sur un même plateau, la rugosité moyenne  $S_a$  peut varier jusqu'à  $5 \mu\text{m}$  avec un écart type  $\sigma = 1,24 \mu\text{m}$ . Par conséquent, une barre d'erreur égale à deux écarts types est utilisée sur les graphiques de rugosité moyenne de surface du reste de cette étude (sauf pour les surfaces supérieures, car l'étude se concentre sur les surfaces latérales).
- Les différences de rugosité moyenne d'une face à l'autre sont significatives et peuvent atteindre jusqu'à  $9 \mu\text{m}$  ( $\sigma = 4,9 \mu\text{m}$ ). En effet, la taille de l'échantillon n'est pas un multiple de l'écart vecteur, ce qui entraîne des configurations de cordons différentes de chaque face. Par conséquent, il est recommandé de toujours mesurer la même face de l'échantillon à des fins de comparaison.
- Enfin, les dispersions de rugosité sur la même face d'un échantillon sont plutôt faibles (environ  $2 \mu\text{m}$  avec  $\sigma = 1.25 \mu\text{m}$ ). Il est recommandé de mesurer au moins sur la partie centrale de la face pour obtenir une rugosité moyenne représentative.



---

# *Chapitre 5 : Influence des paramètres secondaires sur la rugosité latérale*

---

## *Sommaire*

---

<b>5.1. Variable unique</b> .....	124
5.1.1. Stratégies de lasage (sans contour).....	124
5.1.2. Post-scanning.....	126
5.1.3. Compensations .....	128
5.1.4. Contour .....	134
<b>5.2. Effet combiné de plusieurs variables</b> .....	136
5.2.1. Compensations combinées avec une stratégie contour .....	136
5.2.2. Surfaces inclinées avec et sans contour .....	138
<b>5.3. Conclusions</b> .....	139

---



Ce chapitre traite de l'impact des paramètres secondaires du procédé sur la qualité des surfaces générées. Cette étude est divisée en deux volets:

- Etude de chaque variable indépendamment
- Etude de l'effet combiné de plusieurs variables

Dans le premier cas, la rugosité est optimisée et étudiée par la variation d'un seul paramètre à la fois. Cela peut être soit une stratégie de fusion, soit un post-scanning, soit une compensation, soit un contour.

Dans le second cas, l'impact de la combinaison de plusieurs variables est considéré. Par exemple, la compensation combinée au contour ou l'inclinaison de la surface combinée au contour. Dans les deux cas, les paramètres primaires optimisés au chapitre 3 sont utilisés.

## 5.1. Variable unique

### 5.1.1. Stratégies de lasage (sans contour)

Quatre stratégies de fusion laser sont étudiées (voir la Figure 5.1): a) la stratégie croisée à  $90^\circ$  (stratégie de base utilisée dans l'optimisation primaire); b) la stratégie croisée à  $67^\circ$ ; c) la stratégie de balayage en carrés (remplissage en damier); et d) la stratégie de balayage en hexagones. Les stratégies «croisées» ( $90^\circ$  et  $67^\circ$ ) représentent une rotation de couches successives à  $90^\circ$  (Figure 5.1a) respectivement  $67^\circ$  (Figure 5.1b).

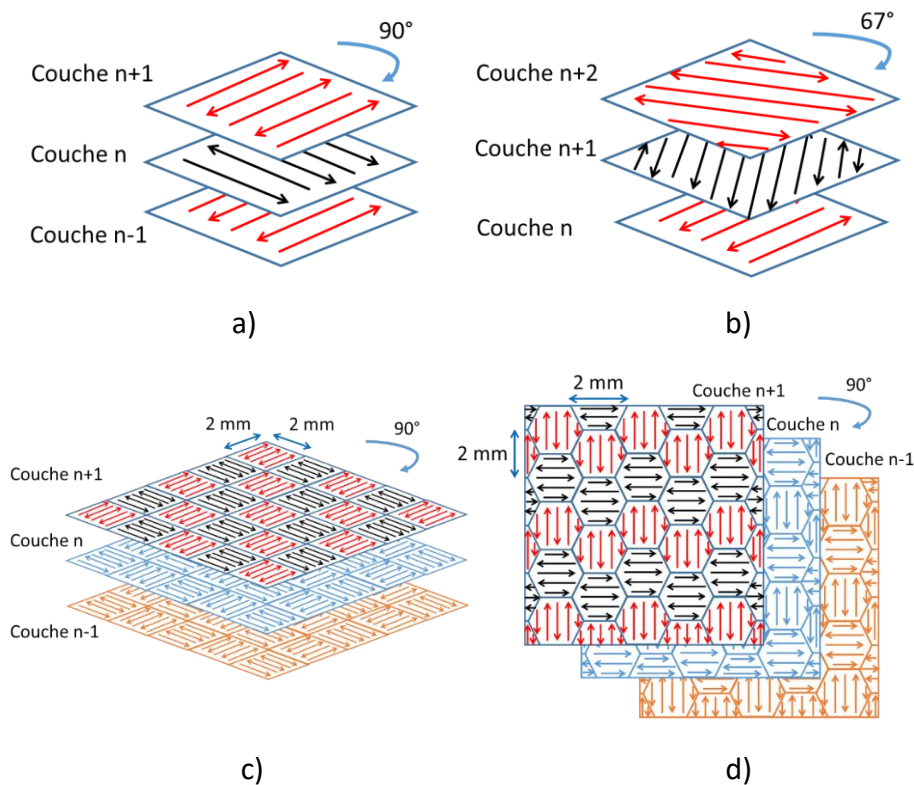


Figure 5.1 – Schéma des stratégies de fusion laser : a) croisée à  $90^\circ$  (stratégie de base); b) croisée à  $67^\circ$ ; c) en carrés (remplissage en damier); d) en hexagones

Les balayages en carrés (Figure 5.1c) et en hexagones (Figure 5.1d) sont des stratégies dans lesquelles la zone de fusion est divisée en petits îlots (carrés ou hexagones). Dans ces îlots l'orientation des lignes laser est alternée entre les directions noires et rouges. L'angle des lignes laser dans chaque îlot entre deux couches successives est de  $90^\circ$ . La dimension des îlots carrés et hexagonaux est de 2 mm par 2 mm.

### Influence de la stratégie de fusion sur la surface supérieure

La stratégie de fabrication peut avoir un effet direct sur la topographie de surface supérieure. Selon les résultats de l'analyse, la rugosité de la surface supérieure en utilisant la stratégie croisée à  $67^\circ$  a peu d'influence par rapport à la stratégie de base (croisée à  $90^\circ$ ) (Figure 5.2). La valeur moyenne arithmétique  $S_a$  de la rugosité varie de  $8 \mu\text{m}$  à  $10 \mu\text{m}$ . Il peut être noté qu'avec des stratégies droites et continues, la rugosité de surface se détériore principalement sur les bords de l'échantillon [82]. Cependant, dans le cas de la stratégie des îlots, des défauts de fusion (l'effet de bord) apparaissent entre les sections de balayage, ce qui détériore la qualité de la surface supérieure (voir section 2.2). Les stratégies des îlots comportent plus de matière près des bords des sections divisées, ce qui crée plus de rugosité dans l'échantillon [82] ( $S_a$  environ  $17.5 \mu\text{m}$ ).

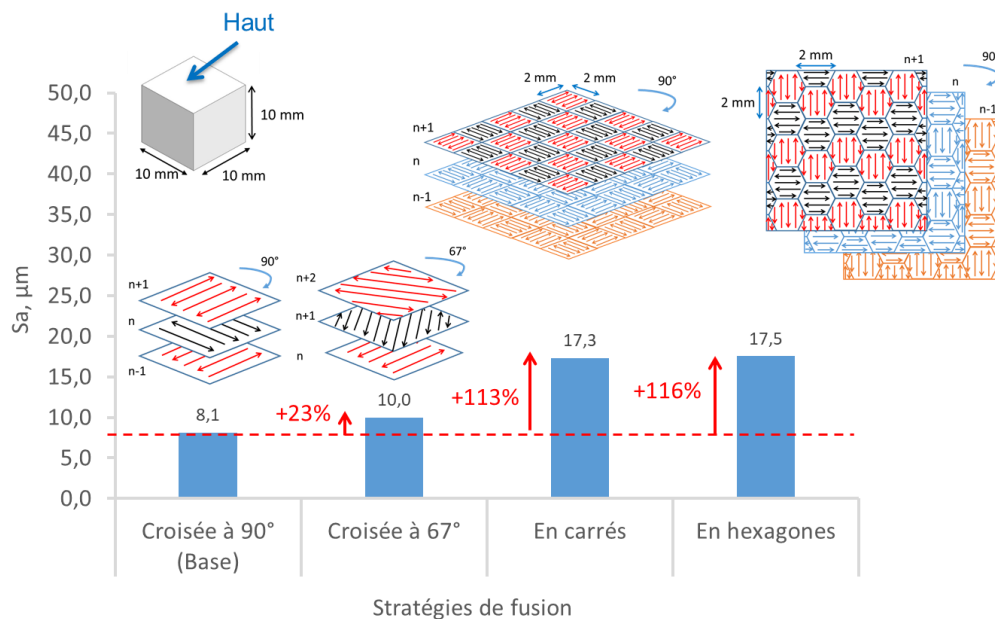


Figure 5.2 – Influence des stratégies de lasage sur la rugosité de la surface supérieure

### Influence de la stratégie de lasage sur la surface latérale

Par rapport à la stratégie de fusion de base, d'autres stratégies dégradent la rugosité de la surface latérale (voir Figure 5.3).

La stratégie croisée à  $67^\circ$  peut provoquer un effet d'escalier en raison de l'absence d'angle droit entre le faisceau laser et la surface latérale de l'échantillon. Cela a un effet négatif sur la rugosité de la surface latérale.

La stratégie de balayage en carrés détériore légèrement la rugosité par rapport à la stratégie en hexagone. Dans le cas de la stratégie en hexagones, la rugosité augmente de 131% et atteint  $50 \mu\text{m}$ . Cette stratégie est probablement mal adaptée à la forme et

aux dimensions de l'échantillon. Les îlots en forme d'hexagones sont inégalement répartis sur la taille de l'échantillon et la jonction entre chaque îlot peut causer des irrégularités au niveau des topographies mesurées.

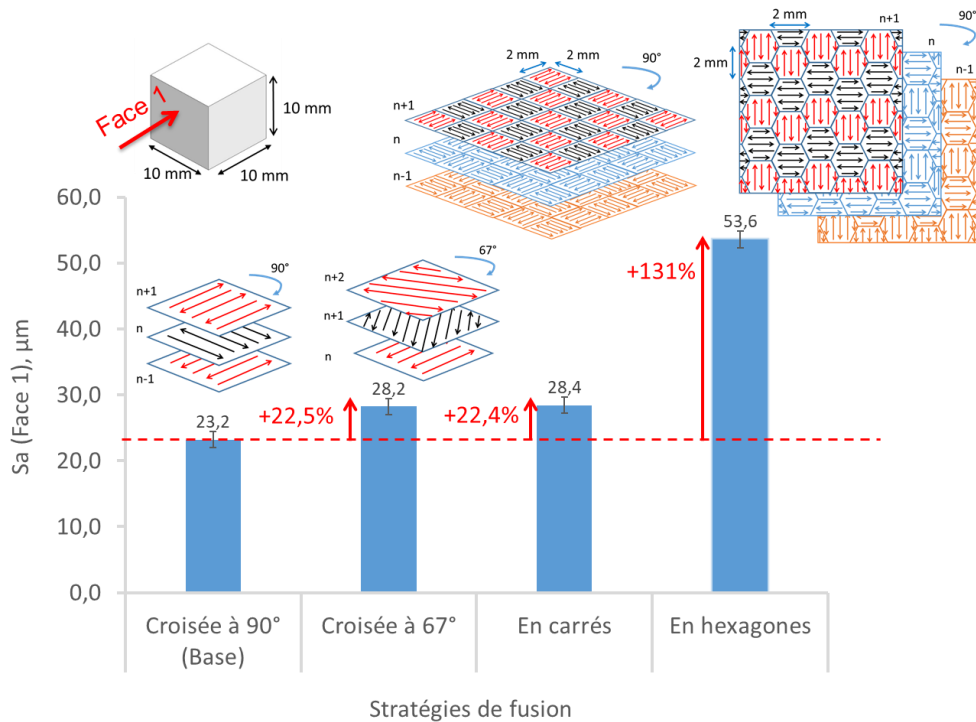


Figure 5.3 – Influence des stratégies de lasage sur la rugosité de la surface latérale

### 5.1.2. Post-scanning

L'effet du post-scan (lasages supplémentaires après un premier lasage) est ensuite examiné. Pour vérifier l'influence sur la surface supérieure, le post-scanning est appliqué uniquement sur la dernière couche. Quant à l'influence sur les surfaces latérales, le post-scanning est appliqué sur toutes les couches. La littérature indique que l'utilisation d'un écart vecteur et d'une vitesse de balayage plus petits par rapport aux paramètres de référence, ainsi que l'augmentation du nombre de post-scan, permet d'obtenir une meilleure qualité de surface [42, 48]. Par conséquent, le premier échantillon n'est pas post-scanné; les deuxièmes et troisièmes échantillons sont post-scannés une fois et cinq fois respectivement. La puissance du laser est identique aux paramètres de base. La vitesse de balayage et l'écart vecteur sont réduits de moitié (voir Tableau 5.1 et Figure 5.4).

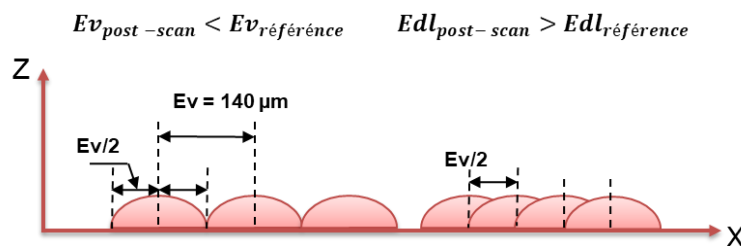


Figure 5.4 – Le schéma de chevauchement des cordons de fusion multiples avec l'écart vecteur de base (à gauche) et l'écart vecteur de post-scan (à droite)

Tableau 5.1 – Paramètres de post-scanning

Numéro d'échantillon	Nombre de fois	Puissance, W	Vitesse, mm/s	Ecart vecteur, $\mu\text{m}$
Dernière couche				
1	Pas de post-scan	260	1000	140
2	Une	260	600	70
3	Cinq	260	600	70
Chaque couche				
1	Pas de post-scan	260	1000	140
2	Une	260	600	70
3	Cinq	260	600	70

### Surface supérieure

La Figure 5.5 montre que la surface de l'échantillon sans post-scan est irrégulière et présente des particules de poudre attachées. Le deuxième échantillon, avec un post scanning de la dernière couche d'échantillon, montre une légère réduction de la rugosité de surface. La surface supérieure du troisième échantillon, qui a été post scannée cinq fois, est plus lisse et présente des profils de surface réguliers. Dans ce cas, la rugosité  $S_a$  diminue de 42 % et égale à 4,7  $\mu\text{m}$ .

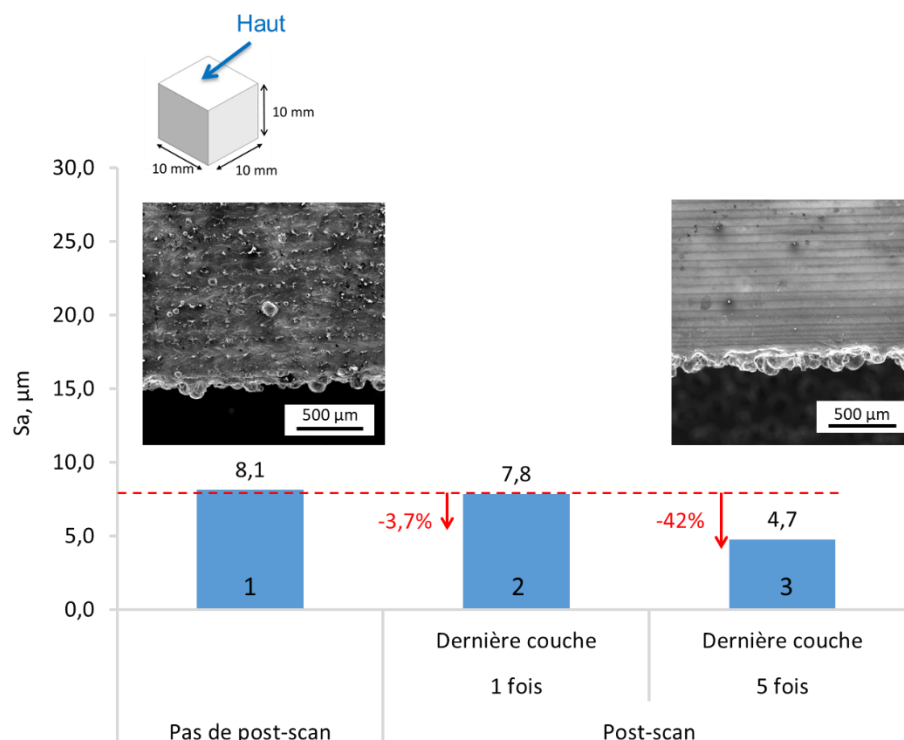


Figure 5.5 – Effet du post-scanning sur la rugosité de surface supérieure

### Surface latérale

Le post scanning de chaque couche dégrade considérablement la rugosité de la surface latérale (Figure 5.6). Par rapport à l'échantillon de référence, la valeur de la rugosité de surface augmente de 102 % avec un seul post scanning de chaque couche et de 127 % avec cinq post scannings. Ceci est probablement dû à une surchauffe des

couches. Le chevauchement important causé par une faible valeur de l'écart vecteur et la répétition des post scanning augmente la valeur de l'énergie thermique reçue par les surfaces. Ainsi une plus grande zone affectée par la chaleur se forme. En conséquence, la surface devient irrégulière avec un grand nombre de particules de poudre attachées.

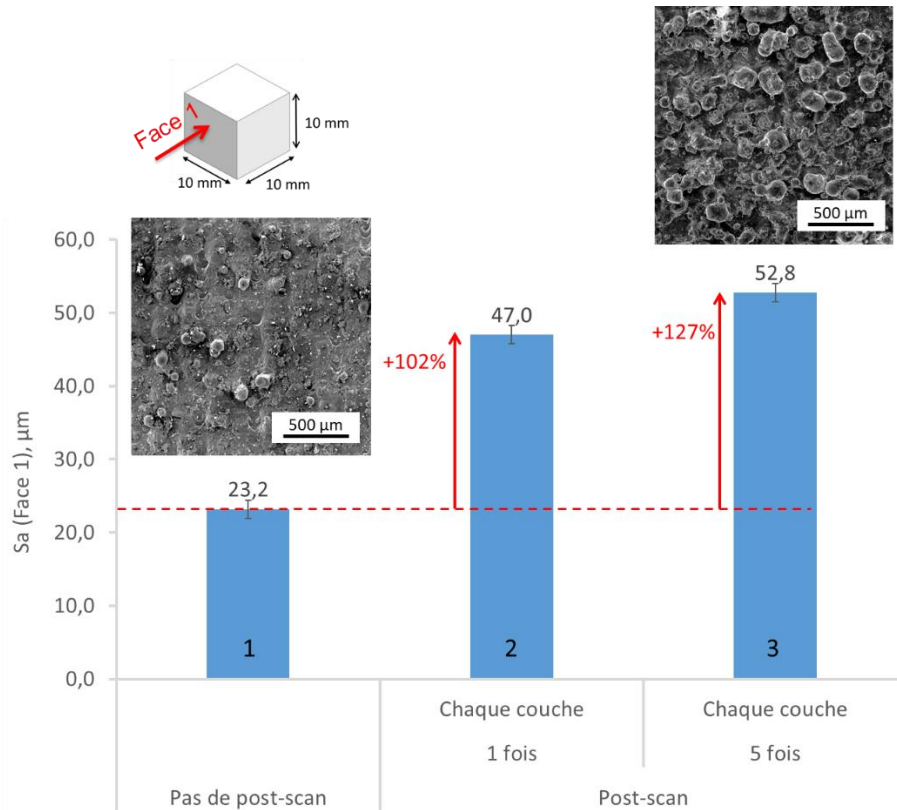


Figure 5.6 – Effet de post-scanning sur la rugosité de surface latérale

### 5.1.3. Compensations

Pour comprendre les paramètres de compensation, il est nécessaire de considérer les trajectoires aller/retour du laser (voir Figure 5.7) lorsqu'il est allumé et éteint. Tout d'abord, il est important de savoir que la tête laser effectue des mouvements supplémentaires même lorsque le laser est éteint.

La Figure 5.7 explique comme suit : lors d'un déplacement dans le sens inverse, le laser (trajectoire marquée en rouge) s'éteint à une "position fin" mais la tête continue à se déplacer (trajectoire marquée en bleu). Elle décélère jusqu'à atteindre le point de retour en arrière (vitesse nulle). Ensuite, la tête se décale d'un écart vecteur, puis accélère dans la direction opposée (trajectoire marquée en bleu) jusqu'à ce qu'elle atteigne une vitesse nominale constante à une "position de départ" (début). À ce moment, le laser est allumé et recommence à produire (trajectoire marquée en rouge).

La compensation est donc une extension des trajectoires calculées, au début et à la fin des vecteurs de balayage, ce qui est nécessaire pour produire des échantillons avec une vitesse laser constante. Les paramètres de compensation permettent de modifier les positions de début et de fin de cordon.

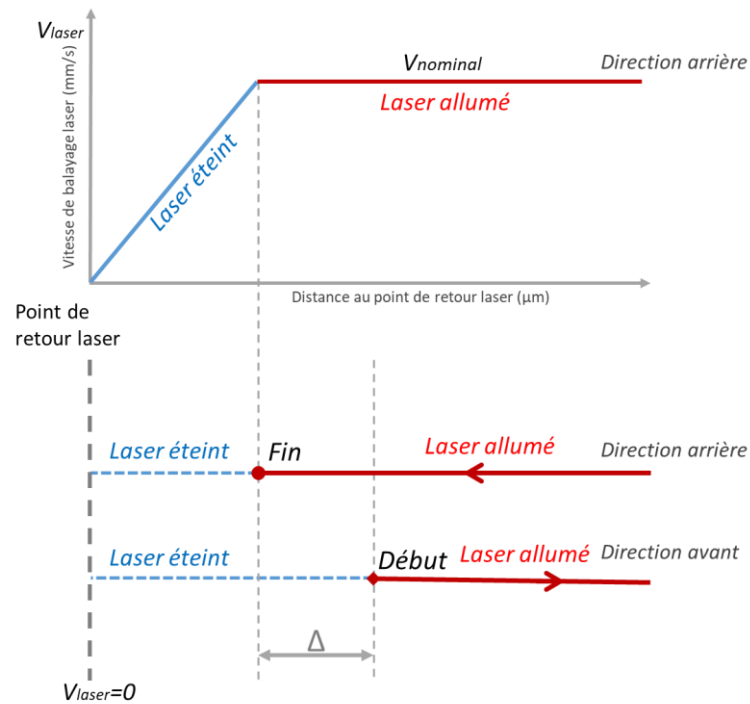


Figure 5.7 – Représentation schématique du trajet de la tête laser avec description des paramètres de compensation

Il est important de noter que la valeur de compensation égale à zéro (pour le début et la fin du vecteur de balayage) est à l'intérieur de la limite théorique de la pièce. La Figure 5.8 montre des cordons sur un plateau sans poudre. Avec une valeur de compensation = 0 et un offset = 0, le début et la fin des cordons sont décalés vers l'intérieur à une distance égale à 400 μm de la limite de la pièce (zone zéro, Figure 5.8a). Si la valeur d'offset est égale à -40 μm, le zéro de compensation est décalé vers l'intérieur de la pièce d'une distance de 440 μm (Figure 5.8b). La précision dimensionnelle de la fabrication de la pièce dépend donc fortement de la valeur de compensation.

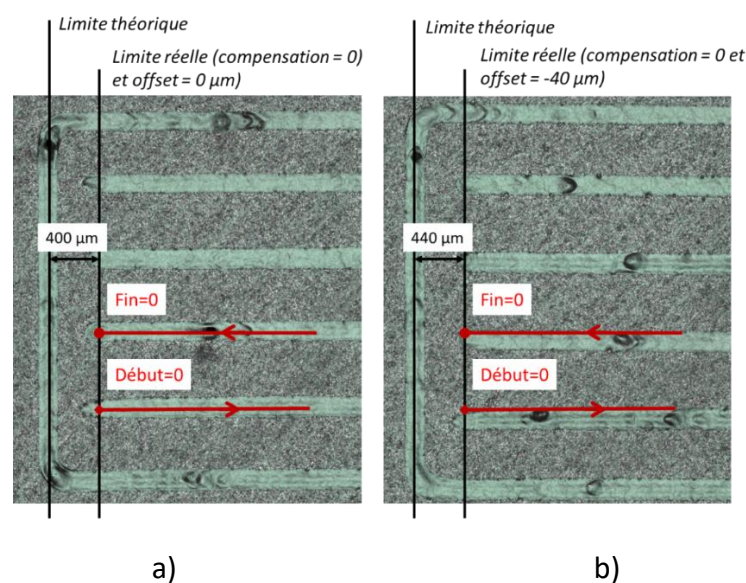


Figure 5.8 – Position de la valeur de compensation égale à zéro par rapport à la limite théorique de la pièce: a) offset = 0; b) offset = -40 μm



La Figure 5.9 montre schématiquement les positions du point de retour laser, de l'offset et de la compensation par rapport au bord de la pièce (limite théorique). La compensation ne peut avoir que des valeurs positives.

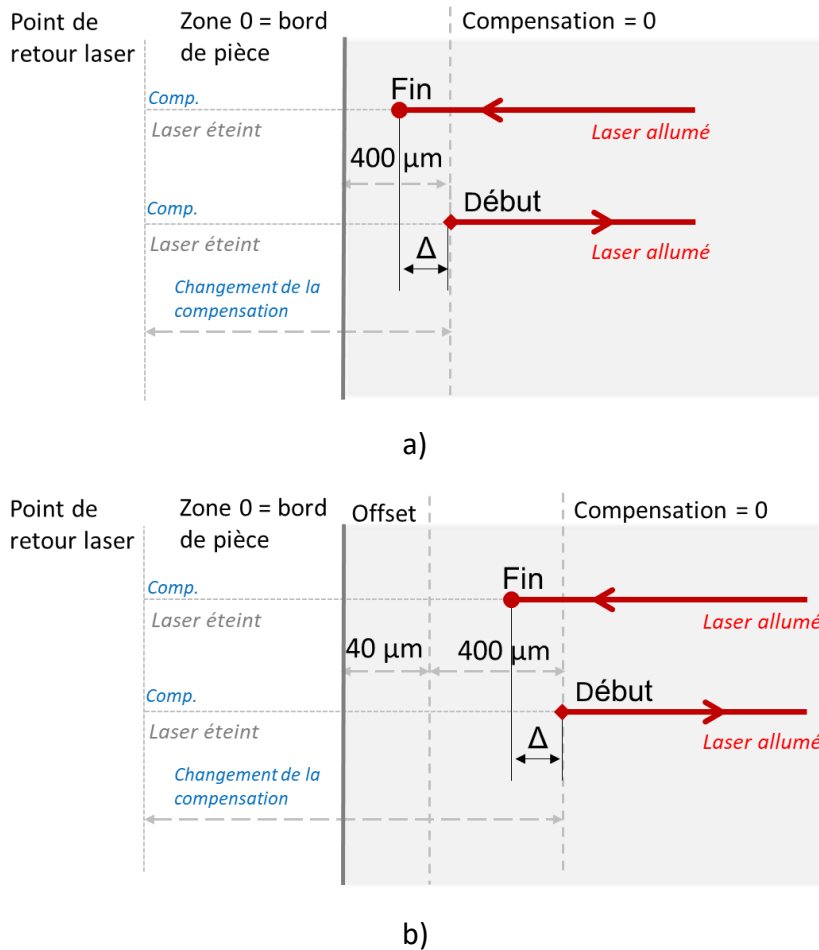


Figure 5.9 – Représentation schématique de la position de compensation par rapport au bord de la pièce (zone zéro): a) avec un offset = 0; b) avec un offset = -40 μm

Le paramètre qui nous intéresse dans cette partie de l'étude est la différence entre les positions de départ et d'arrêt delta ( $\Delta$ ). Le delta ( $\Delta$ ) est défini comme la différence entre le point « Début » et le point « Fin »:  $\Delta = \text{Début} - \text{Fin}$ . Il peut être positif ( $\Delta > 0 \Rightarrow \text{Début} > \text{Fin}$ ), négatif ( $\Delta < 0 \Rightarrow \text{Début} < \text{Fin}$ ), ou égal à zéro  $\Delta = 0 \Rightarrow \text{Début} = \text{Fin}$  (voir la Figure 5.10).

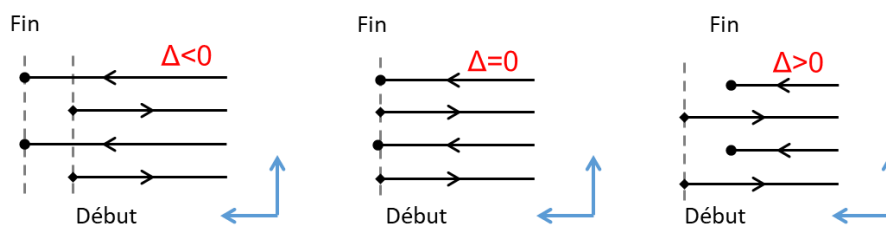


Figure 5.10 – Représentation schématique du changement de delta en fonction de la position de Fin par rapport au Début

Dans cette expérience, la position de Début est maintenue constante et la position de Fin est modifiée. Le  $\Delta$  varie de -140 à 140  $\mu\text{m}$  par pas de 20  $\mu\text{m}$  (Tableau 5.2).

Tableau 5.2 – Paramètres Delta

Paramètres	Valeurs ( $\mu\text{m}$ )
Delta négatif, $\Delta < 0$ ( $\mu\text{m}$ )	-140, -120, -100, -80, -60, -40, -20
Delta égal à zéro, $\Delta = 0$ ( $\mu\text{m}$ )	0
Delta positif, $\Delta > 0$ ( $\mu\text{m}$ )	20, 40, 60, 80, 100, 120, 140

La Figure 5.11 montre la rugosité de surface latérale en fonction de  $\Delta$ . La valeur de compensation standard recommandée par le fabricant de la machine LPBF est  $\Delta = -20$   $\mu\text{m}$ .

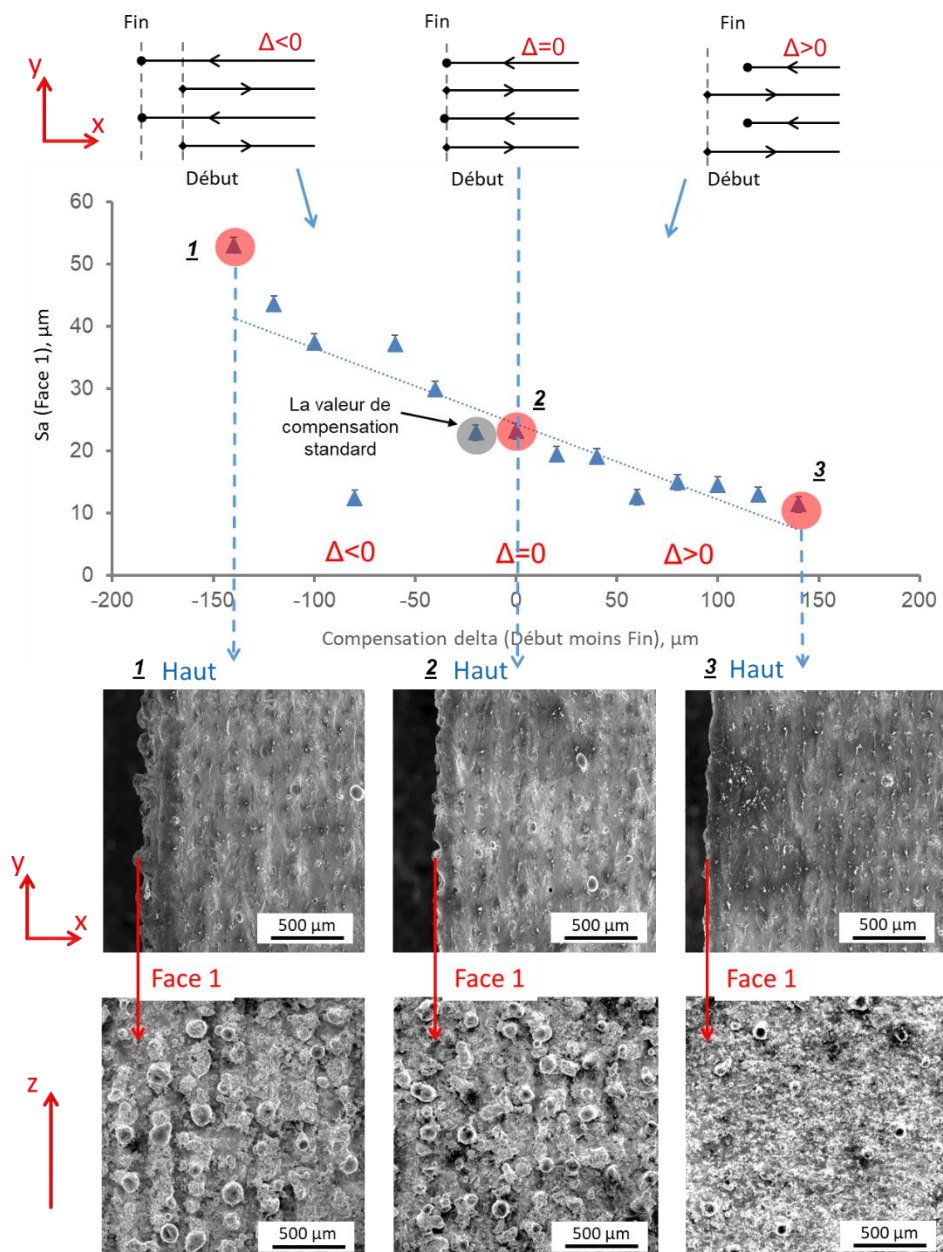


Figure 5.11 – Diminution de la rugosité de la surface latérale en fonction du paramètre de compensation  $\Delta$



Pour une compensation standard, la rugosité moyenne surfacique  $Sa$  est d'environ  $23 \mu\text{m}$ , ce qui correspond à la valeur obtenue lors de l'optimisation VED discutée dans le Chapitre 3. Le graphique montre clairement que, lorsque  $\Delta$  est augmenté,  $Sa$  diminue linéairement. Lorsque  $\Delta$  est égal  $-140 \mu\text{m}$ ,  $Sa$  est égal à  $50 \mu\text{m}$ , alors que, lorsque  $\Delta = 140 \mu\text{m}$ ,  $Sa$  est égal à  $11 \mu\text{m}$ . Par conséquent, la rugosité peut être diminuée d'un facteur cinq en modifiant le paramètre de compensation  $\Delta$ .

Pour mieux comprendre ces résultats, une analyse MEB est réalisée sur trois échantillons du lot : i)  $\Delta = -140 \mu\text{m}$ , ii)  $0 \mu\text{m}$ , et iii)  $140 \mu\text{m}$ . Les surfaces latérales et les bords des surfaces supérieures sont observés et révèlent des topographies très différentes. Pour  $\Delta$  négatif ou nul, une quantité importante de balling et particules attachées sont observés. De plus, la stratégie de balayage est visible car la distance entre les vecteurs de balayage (l'écart vecteur) peut être observée. Les vecteurs de balayage delta positifs ne sont pas visibles, et l'effet balling ainsi que le nombre de particules attachées sont limités.

La raison de ce phénomène s'explique d'abord au niveau du cordon (voir Figure 5.12).

- La fin de cordon génère un bain de fusion (et une frontière solidifiée) avec un rayon très grossier. Par conséquent, des surfaces rugueuses sont générées. De plus, un bain de fusion large absorbe plus de poudre en peu de temps en raison de la température élevée. Cela conduit à une augmentation de la quantité de liquide. Le liquide pénètre dans la poudre environnante mais ne peut pas la faire fondre suffisamment. En conséquence, des amas, agglomérats sont formés.
- Le début de cordon génère des surfaces plus fines. Le rayon du bain de fusion étant plus petit, un plus petit nombre de particules de poudre est attiré et fixé en surface.

Par conséquent, la plupart de ces observations sont en accord avec l'hydrodynamique du bain de fusion (forme de comète) [44,61].

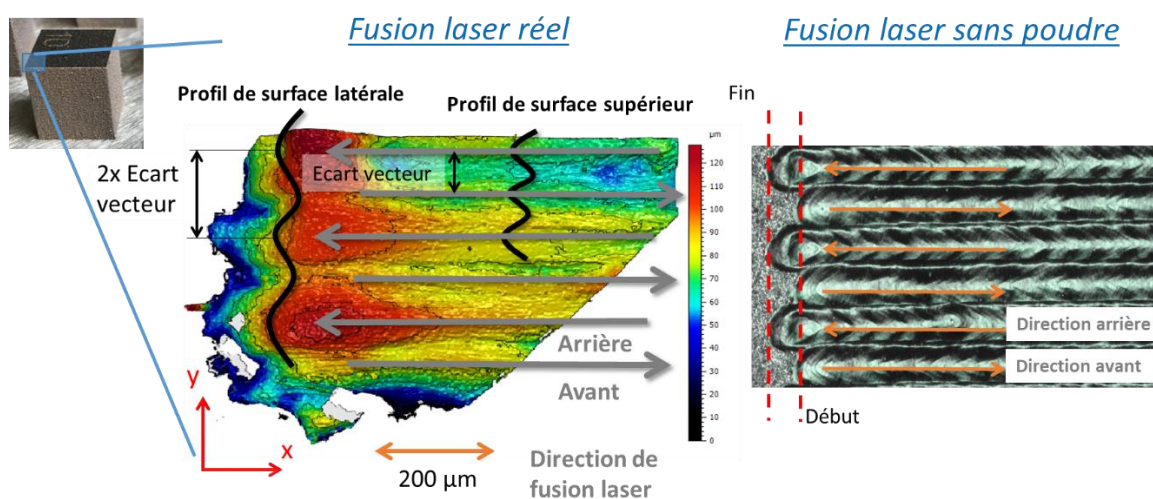


Figure 5.12 – Forme du bain de fusion solidifiée à la fin et au début du cordon [14] et sans poudre

Au niveau de la pièce, le réglage de la compensation  $\Delta$  permet de masquer ou de souligner la présence de surfaces grossières générées par la tête avant des vecteurs d'extrémité (fin de cordon).

- Une valeur de compensation négative (cordons de fin masquent les cordons de début) met en évidence les surfaces générées par le cordon de fin (rayon grossier, balling et particules non fusionnées). En conséquence, des surfaces rugueuses sont obtenues.
- Une valeur de compensation positive (cordons de début masquent les cordons de fin) met en évidence les surfaces générées par le cordon de début. Par conséquent, des surfaces plus fines sont obtenues (rayon plus fin, moins de balling et moins de particules non fusionnées).

Enfin, la compensation positive génère un deuxième effet bénéfique (voir Figure 5.13).

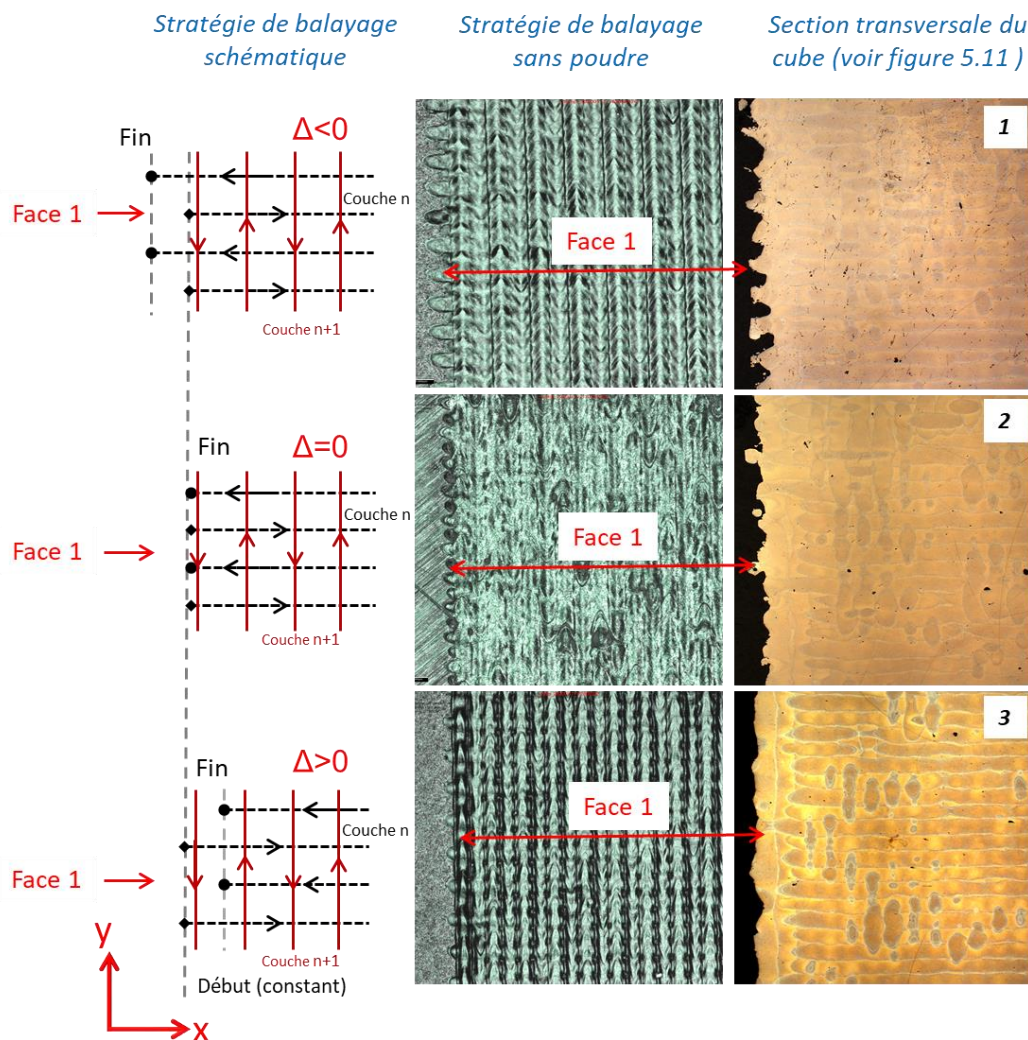


Figure 5.13 – Fin des cordons disparaissant à l'intérieur du cube au profit des cordons de la couche  $n + 1$ , parallèles à la surface générée.

Pour des compensations positives élevées, les Fin vecteurs "s'enfoncent" dans le matériau et révèlent les couches  $n+1$  et  $n-1$  parallèles à la surface générée. Les vecteurs

parallèles à la surface génèrent des surfaces plus fines. Cependant, un effet néfaste de cette compensation est que les dimensions de l'échantillon sont alors régies par les vecteurs parallèles. Les vecteurs perpendiculaires devraient régir les dimensions de l'échantillon.

Pour des compensations positives plus élevées, aucun autre effet bénéfique n'est observé car la couche n+1 régit alors la topographie. De plus, une porosité est susceptible d'apparaître.

#### 5.1.4. Contour

Deux réglages de contour sont étudiés et sont présentés sur la Figure 5.14.

- Dans le premier cas, la zone interne de l'échantillon (cœur) est d'abord remplie (avec la stratégie classique de va-et-vient), et le balayage du contour est ensuite effectué. Ce réglage est appelé "Lasage puis contour".
- Dans le second cas, un contour est d'abord effectué, puis la zone interne (cœur) de l'échantillon est remplie (avec la stratégie classique de va-et-vient). Ce paramètre est appelé "Contour puis lasage."

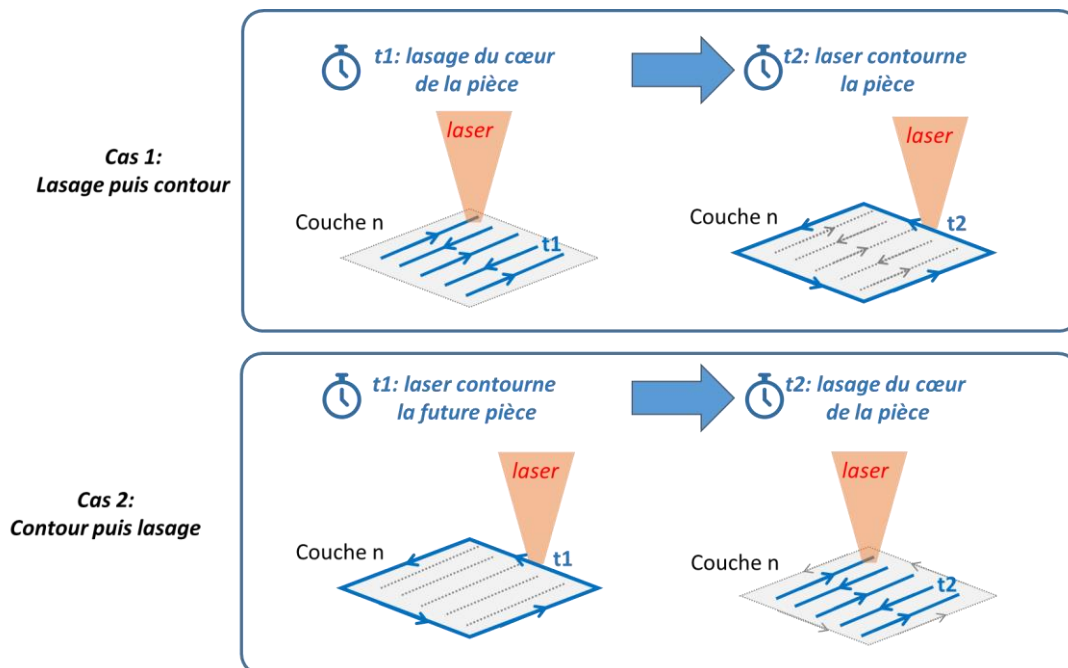


Figure 5.14 – Deux cas de réglages de contour : "Lasage puis contour" et "Contour puis lasage"

Les mêmes paramètres primaires du procédé sont utilisés pour le balayage des contours. La Figure 5.15 montre l'effet des réglages de contour sur la rugosité de surface. En considérant un cube avec des paramètres de base et sans réglage de contour, la valeur de la rugosité reste dans la limite de 20  $\mu\text{m}$ . Cependant, lorsqu'un contour est ajouté, la rugosité de surface change comme suit.

- Le réglage du contour « Lasage puis contour » augmente la rugosité de 6.5%.
- Le réglage du contour « Contour puis lasage » réduit la rugosité de 57.4 % (diminution de la rugosité moyenne de la surface de 22.7 à 10.3  $\mu\text{m}$ ).

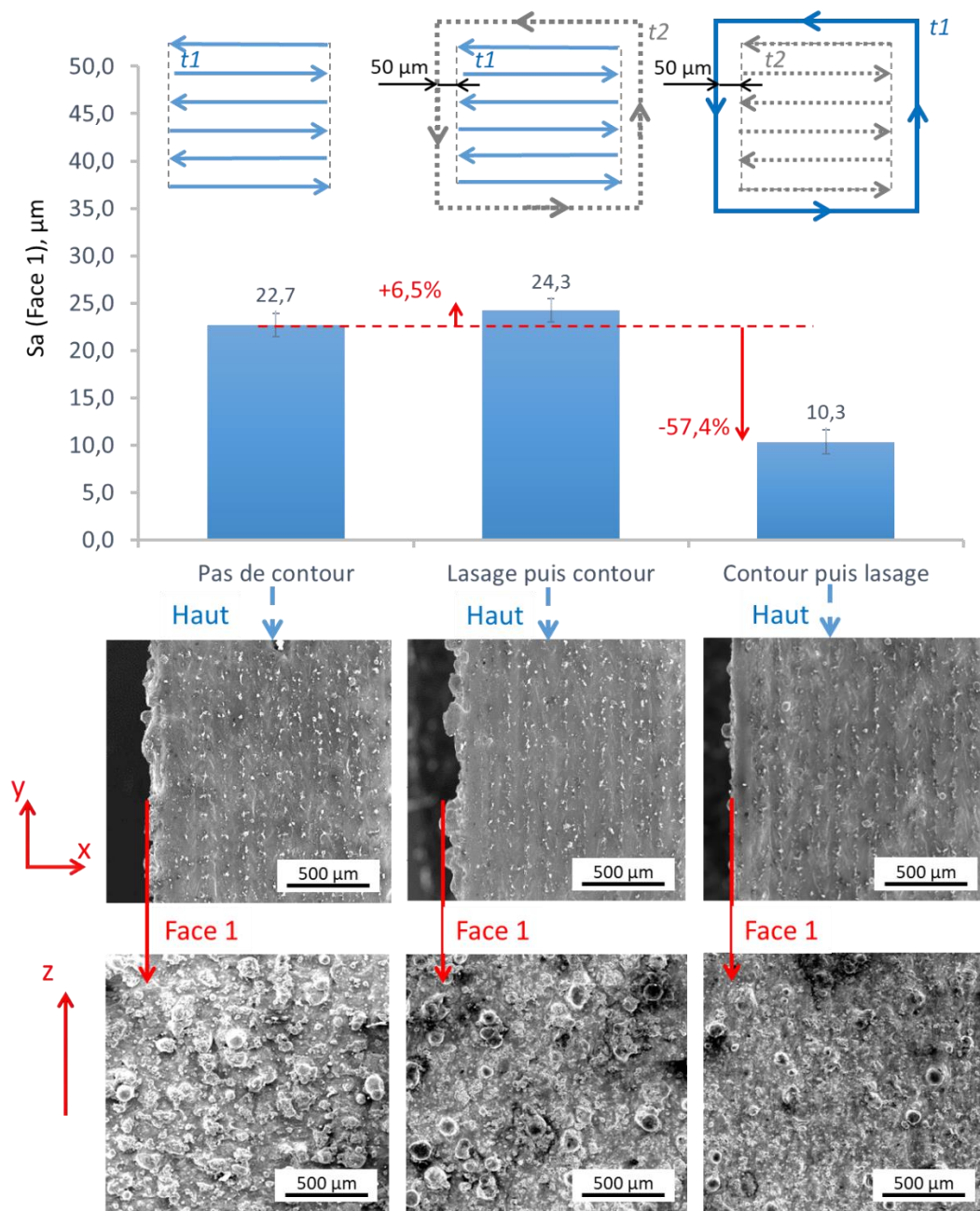


Figure 5.15 – L'effet du contour sur la rugosité de la surface latérale

Une explication de la diminution de la rugosité si le contour est effectué avant le balayage normal est la suivante:

- Dans le cas de « Contour puis lasage », le trajet du contour traverse un lit de poudre homogène (Figure 5.16).
- Dans le cas de « Lasage puis contour », le trajet de contour traverse un lit de poudre qui a été affecté par le premier trajet de fusion. En conséquence, le lit de poudre est moins régulier et des effets de balling peuvent apparaître. La rugosité de surface est donc détériorée car le laser scanne un lit de poudre hétérogène (Figure 5.17).



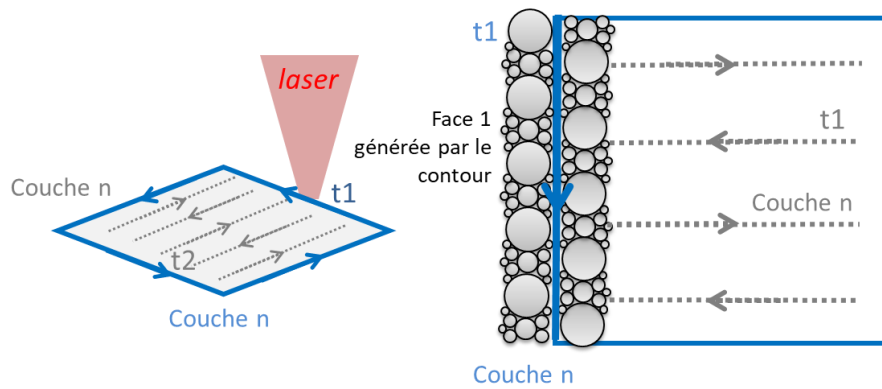


Figure 5.16 – Réglage du contour « Contour puis lasage »

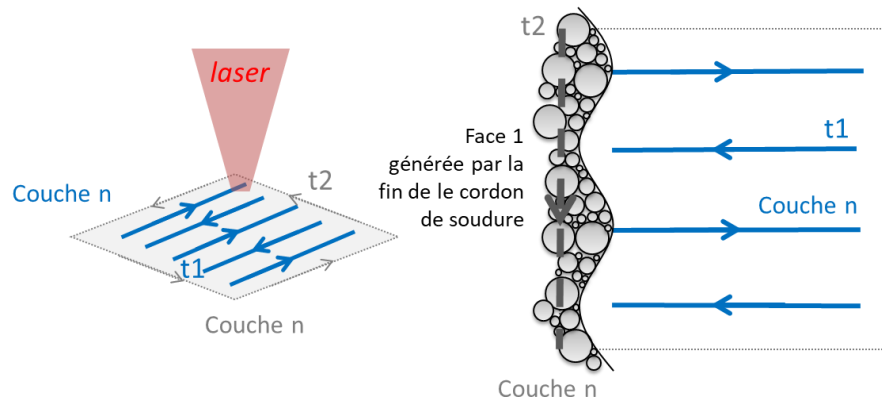


Figure 5.17 – Réglage du contour « Lasage puis contour »

## 5.2. Effet combiné de plusieurs variables

### 5.2.1. Compensations combinées avec une stratégie contour

Comme indiqué précédemment, le réglage du contour « Contour puis lasage » réduit la rugosité de la surface latérale à  $10,3 \mu\text{m}$ . Par contre, une compensation avec un delta positif  $\Delta = 140 \mu\text{m}$  donne une valeur de rugosité de  $11 \mu\text{m}$ . Il est maintenant important de comprendre comment la rugosité de la surface latérale sera affectée par l'utilisation simultanée du réglage de contour et de la compensation.

#### Compensation et contour optimisés

La figure 5.18 montre la Face 1 et la Face 4 de l'échantillon, qui est construit en utilisant les paramètres optimaux du contour : le réglage « Contour puis lasage »,  $P=260 \text{ W}$ ,  $V=1000 \text{ mm/s}$ ; et compensation:  $\Delta = 140 \mu\text{m}$  (Début moins Fin).

L'utilisation combinée du contour et de la compensation ne permet pas de réduire plus la rugosité des surfaces latérales (en dessous de  $10 \mu\text{m}$ ). En effet, la surface latérale est alors formée par la stratégie de contour qui génère donc une surface identique à celle obtenue dans le section 5.1.4. L'effet de compensation est donc « caché » derrière l'effet produit par la stratégie de contour (partie droite de la Figure 5.18). Il est

également possible de noter que le contour donne une homogénéité de la rugosité pour les différentes faces de l'échantillon (cf. discussion au Chapitre 4).

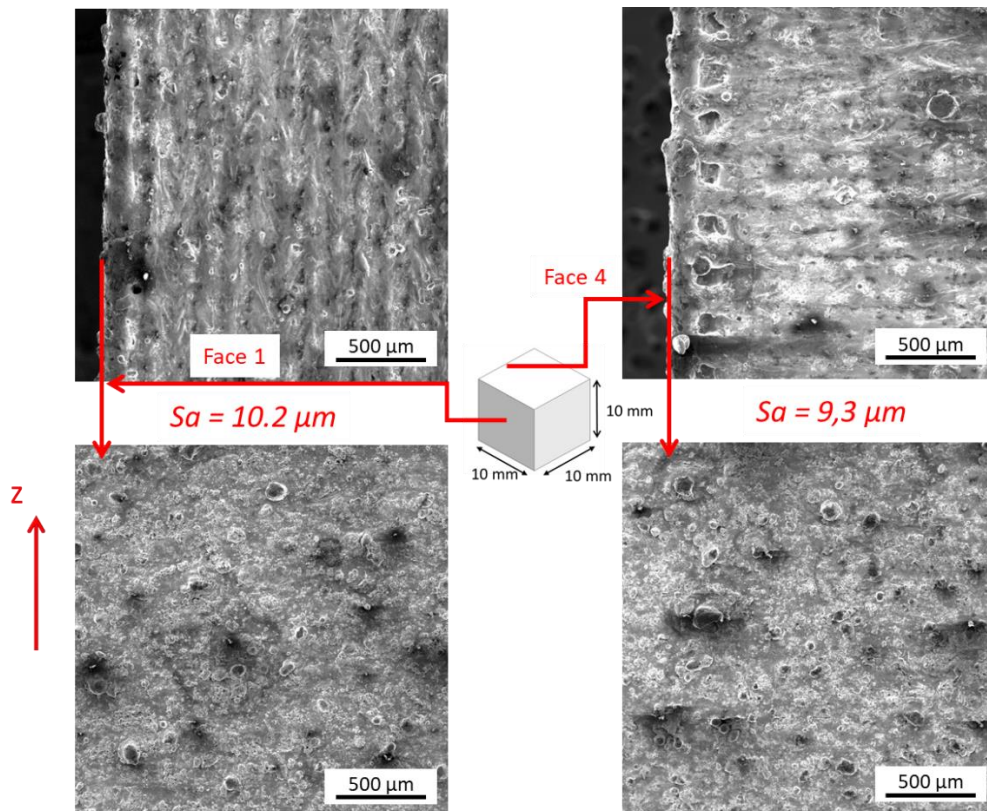


Figure 5.18 – Face 1 et Face 4 de l'échantillon avec compensation et contour optimisés

### **Compensation optimale et contour variable (P et V)**

Maintenant, considérons la combinaison du réglage de la compensation avec les paramètres de contour variables: puissance ( $P$ ,  $W$ ) et vitesse ( $V$ ,  $mm/s$ ). Le Tableau 5.3 présente les conditions de cette étude et les valeurs de rugosité obtenues.

Tableau 5.3 – Paramètres de contour variable

Paramètre de compensation	Réglage du contour	Puissance ( $P$ , $W$ )	Vitesse ( $V$ , $mm/s$ )	Rugosité latérale ( $S_a$ , $\mu m$ )
Compensation optimum : $\Delta = 140 \mu m$	Contour puis lasage	220	800	10,01
		240	800	10,19
		260	800	8,04
		260	1200	9,45
		260	1500	9,03
		280	1000	7,91
		300	1000	8,63

Par ailleurs, la Figure 5.19 montre la variation de la rugosité de surface latérale en fonction de la densité d'énergie linéaire (LED) du contour. La rugosité varie légèrement. Au début, elle augmente avec l'augmentation de la LED, puis elle diminue.

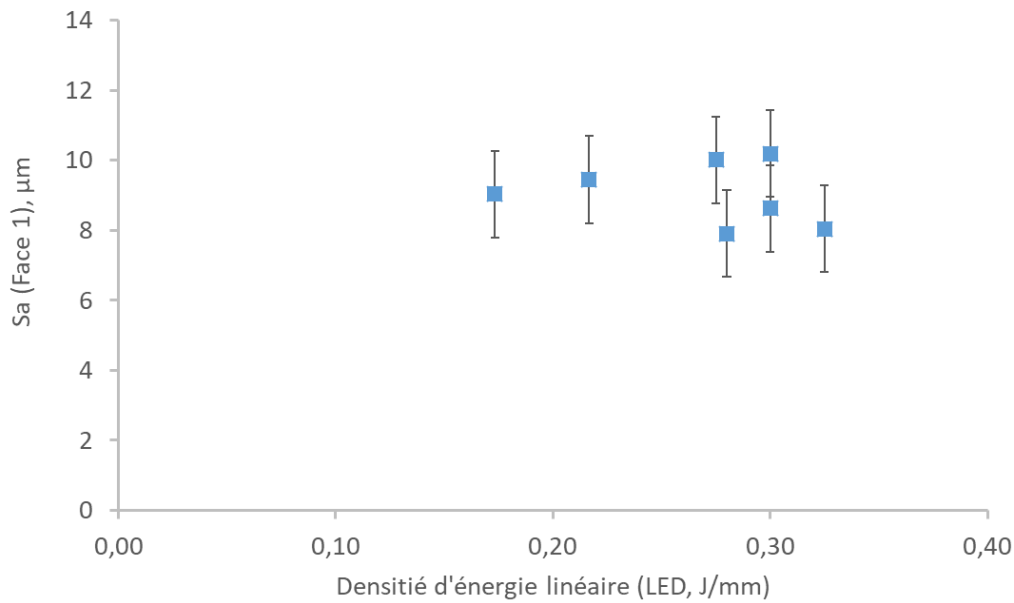


Figure 5.19 – La rugosité de surface latérale en fonction de la densité d'énergie linéaire (LED) du contour

### 5.2.2. Surfaces inclinées avec et sans contour

Il est connu que la rugosité de surface dépend fortement de l'angle d'inclinaison de la pièce. La rugosité maximale est atteinte à un angle d'inclinaison de  $45^\circ$  [14,43]. On constate que le réglage du contour "contour puis scan" réduit la rugosité de moitié pour les échantillons avec des bords perpendiculaires (angle d'inclinaison =  $0^\circ$ ). Il est important d'observer l'effet du contour sur des échantillons avec différents angles d'inclinaison (Figure 5.20). Pour ce faire, huit échantillons sont fabriqués avec des angles d'inclinaison de  $5^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $25^\circ$  et  $35^\circ$ . Quatre d'entre eux n'ont pas du réglage de contour, d'autres ont le réglage « Contour puis lasage ».

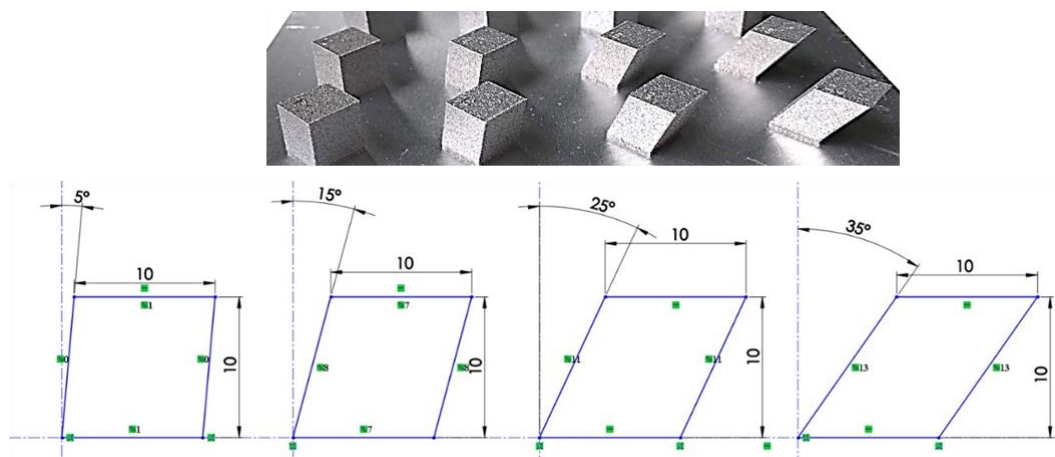


Figure 5.20 – Échantillons inclinés avec et sans réglage de contour

Avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison, la rugosité de la surface latérale augmente (voir la Figure 5.21). D'autre part, le réglage du contour a un effet positif uniquement sur les échantillons avec une légère inclinaison, puis son effet est mineur.

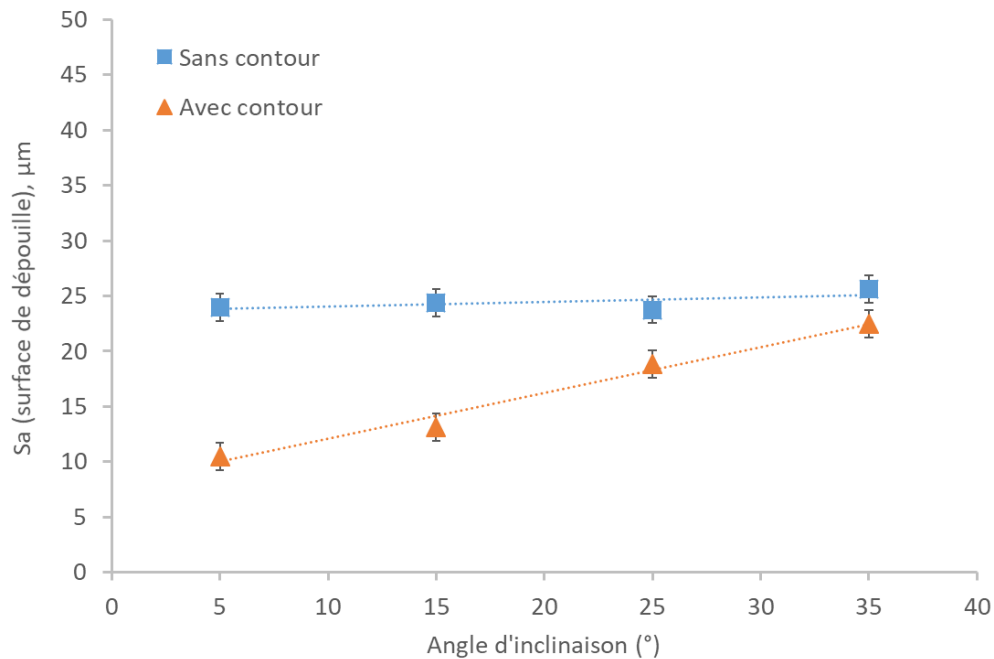


Figure 5.21 – Dépendance de la rugosité de la surface latérale sur l'angle d'inclinaison avec et sans réglage du contour

### 5.3. Conclusions

Dans le cadre d'une optimisation supplémentaire du procédé LPBF, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Deux paramètres secondaires du procédé sont importants pour réduire la rugosité de la surface latérale: la compensation et la stratégie de contour. En observant l'influence de ces paramètres, une meilleure compréhension de la génération de surface dans le procédé LPBF peut être obtenue.
- La fin du cordon forme des irrégularités lorsqu'elle atteint le bord de l'échantillon. Cela est dû au grand rayon et à la température élevée du bain de fusion qui absorbe de grandes quantités de poudre. Dans le cas contraire, les vecteurs génèrent des surfaces plus fines au niveau du début de cordon.
- Le réglage de la compensation (positionnement des vecteurs de début et de fin) permet de masquer ou pas les fins de cordons. Cela peut donc induire la génération de surfaces plus fines (jusqu'à un  $Sa$  de 10 µm) si les cordons de fin sont masqués.
- Un moyen classique d'améliorer les surfaces FA consiste à générer des échantillons avec des cordons parallèles aux surfaces latérales : stratégies de contour. Si le contour est réalisé avant de balayer le cœur de l'échantillon, le laser traverse un lit de poudre homogène, conduisant à une fine rugosité de surface ( $Sa$  de 10 µm).
- D'autre part, le réglage du contour cesse d'avoir un effet positif sur la rugosité lorsque l'angle d'inclinaison des surfaces de l'échantillon augmente.
- L'utilisation simultanée des options de contour et de compensation ne modifie pas beaucoup la rugosité de surface résultante et donne un  $Sa$  de 8 à 10 µm.





---

# *Chapitre 6 : Modélisation de la génération des surfaces latérales*

---

## *Sommaire*

---

<b>6.1. Etude préliminaire .....</b>	<b>142</b>
6.1.1. Etude préliminaire .....	142
<b>6.2. Démarche générale de modélisation .....</b>	<b>146</b>
6.2.1. Modélisation de mono cordons .....	146
6.2.2. Combinaison de plusieurs cordons .....	147
<b>6.3. Validation du modèle avec les résultats expérimentaux .....</b>	<b>151</b>
<b>6.4. Étude de sensibilité du modèle .....</b>	<b>158</b>
<b>6.5. Conclusions.....</b>	<b>161</b>

---

Comme mentionné précédemment dans le Chapitre 1 (section 1.5) il existe très peu de modèles permettant de prédire la rugosité des surfaces générées par le procédé LPBF. La plupart d'entre eux modélisent uniquement l'effet escalier produit par l'inclinaison par des échantillons. Le principal inconvénient de ces modèles est le pourcentage d'erreur élevé dans la prédiction de la topographie pour les surfaces verticales et horizontales avec un angle d'orientation de fabrication respectivement de 90° et 0°.

Ce chapitre présente une approche nouvelle pour la modélisation des surfaces latérales (à 0°). L'essence de cette approche consiste à présenter un modèle numérique dont les paramètres d'entrée sont les valeurs moyennes des rayons de courbure des cordons : rayon du début, rayon de la fin et rayon du côté. Le modèle prend également en compte la position relative des cordons et des couches de la pièce les uns par rapport aux autres. Ainsi il est possible de prédire la rugosité pour différentes stratégies de fusion, paramètres de compensation.

La première partie du chapitre présente la collecte de données expérimentales nécessaires au modèle. Pour ce faire, un échantillon est réalisé avec une stratégie « Aller simple ». Un tel échantillon permet la mesure des rayons de courbure des différents cordons.

Dans la deuxième partie la démarche de modélisation est présentée. Le modèle est développé à l'aide du logiciel Matlab. La fonction ellipsoïde est choisie pour décrire la forme des cordons qui sont ensuite positionnés les uns par rapport aux autres. Le modèle développé est ensuite confronté aux résultats expérimentales.

La fin de ce chapitre est dédiée à l'étude de la sensibilité du modèle. L'étude évalue le pourcentage de variation de la valeur de rugosité  $Sa$  résultant de la simulation en fonction de la variation de la valeur de chaque paramètre d'entrée.

### **6.1. Etude préliminaire**

Tout d'abord, il est nécessaire de déterminer les données expérimentales nécessaires au modèle. Il est nécessaire d'obtenir les rayons de courbure de chaque partie du cordon, qui peuvent ensuite être décrits par une fonction mathématique et injectés dans le modèle.

#### **6.1.1. Collecte des données expérimentales**

##### **Création d'un échantillon avec la stratégie « Aller simple »**

Un échantillon est fabriqué avec une stratégie à sens unique: « Aller simple ». Cette stratégie implique que le vecteur de lasage se déplace tout le temps dans la même direction. Cela produit des surfaces qui ont uniquement le début (Face 1), la fin (Face 3) et les côtés des cordons (Face 2 et Face 4), voir la Figure 6.1.

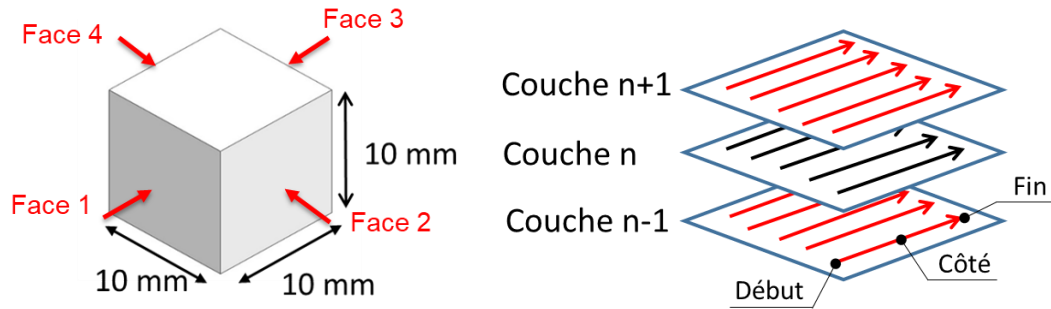


Figure 6.1 – Echantillon produit avec une stratégie « Aller simple » et représentation des surfaces avec le début (Face 1), la fin (Face 3) et les côtés (Faces 2 et 4) des cordons

Ensuite, une observation au MEB est réalisée afin de relever les différences de topographie entre ces surfaces (Figure 6.2). La stratégie à sens unique confirme que la fin du cordon génère une surface très rugueuse. Ainsi, la rugosité  $Sa$  de la Face 3 est trois fois supérieure à la rugosité  $Sa$  de la Face 1. Cela confirme la conclusion tirée au Chapitre 5 que la fin de cordon absorbe plus de poudre en peu de temps en raison de la température élevée. En conséquence, les amas et agglomérats sont formés à partir d'un matériau partiellement fondu et solidifié. Quant au côté du cordon, il est parallèle à la surface latérale et l'effet de contour avec une rugosité  $Sa = 8 \mu m$  est observé.

Le fait de disposer d'un tel échantillon montre l'influence distincte de chaque partie du cordon sur la topographie de la surface et simplifie le processus de mesure de ses rayons.

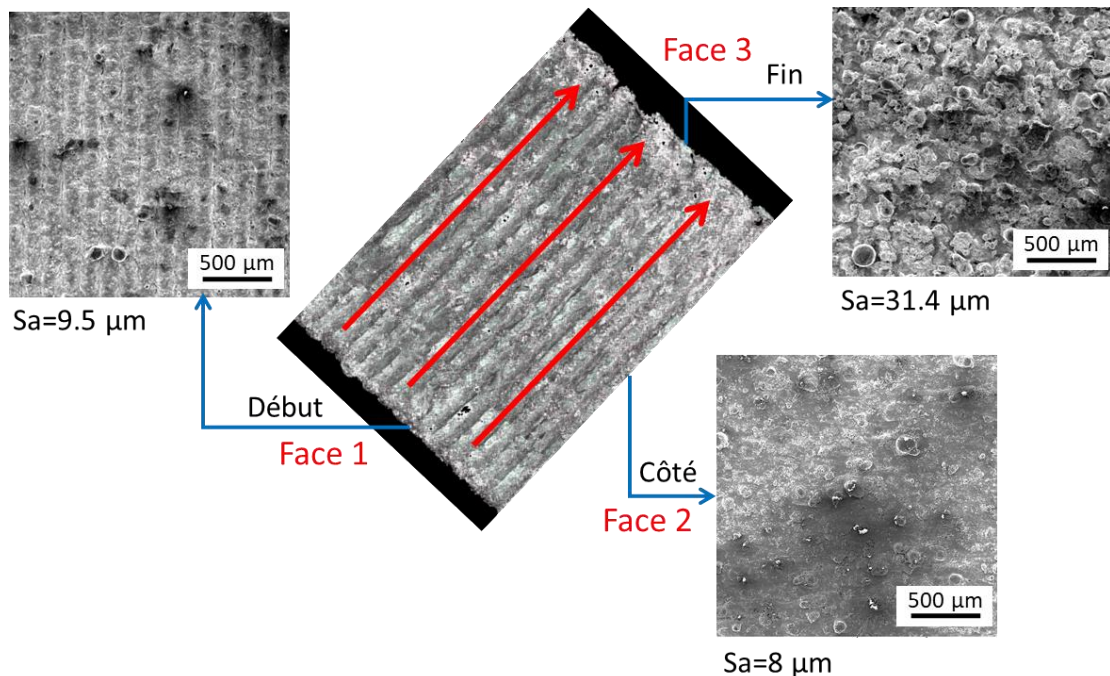


Figure 6.2 – Images MEB montrant la différence de topographie entre les Face 1, Face 2 et Face 3

**Mesure des rayons de courbure des différents cordons**

L'échantillon avec la stratégie « Aller simple » est découpé en trois plans : YX, ZY, XZ. Les rayons des cordons sont mesurés dans chaque plan. Les mesures sont prises à l'aide d'un microscope à variation de focus. Les échantillons sont polis. Il est important de noter qu'au moins cinq mesures sont prises dans chaque plan, puis la valeur moyenne du rayon est calculée (Figure 6.3).

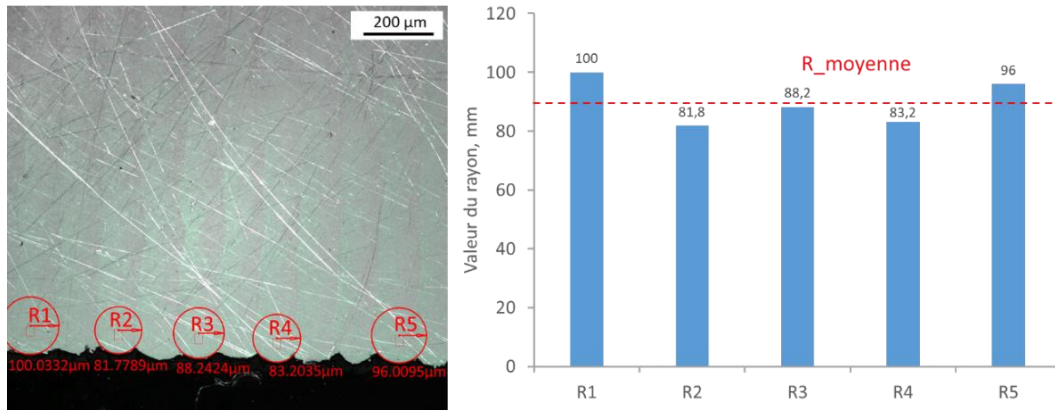


Figure 6.3 – Détermination de la valeur moyenne à partir de cinq mesures de rayon

Dans le plan XY les rayons de début  $R_{yx\_début}$  et de fin  $R_{yx\_fin}$  sont mesurés (Figure 6.4). Les images montrent clairement la position des cordons les uns par rapport aux autres. La largeur des cordons dans ce plan est égale à l'écart vecteur  $h = 140 \mu m$ .

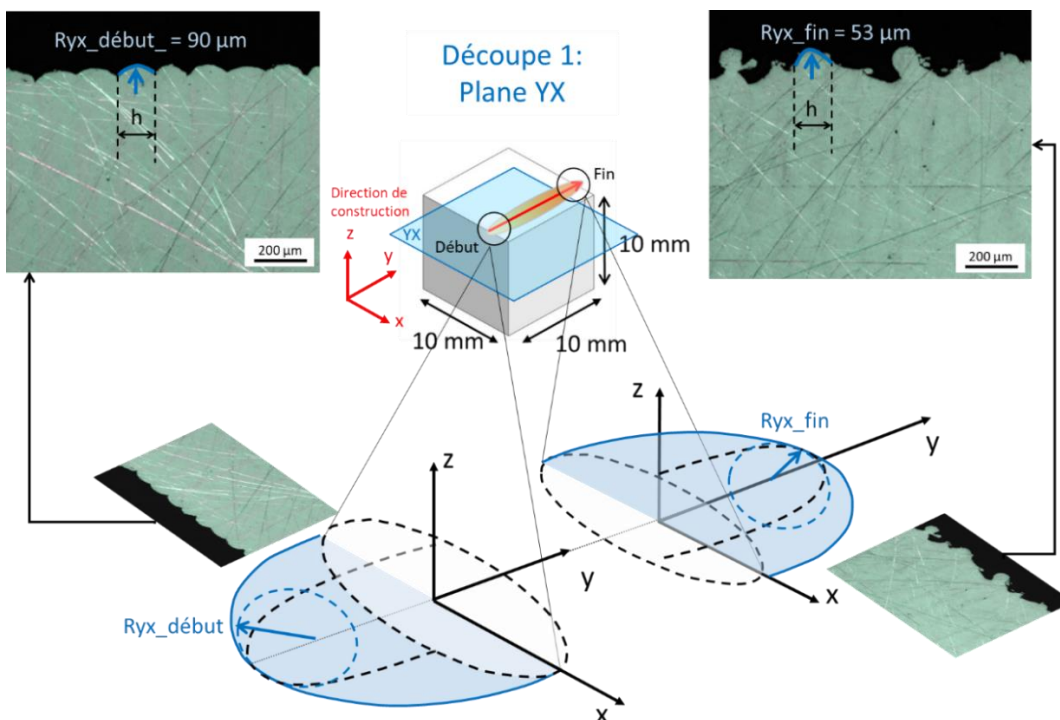


Figure 6.4 – Mesure du début et de la fin des cordons dans le plan YX

Ensuite, les rayons de début et de fin sont à nouveau mesurés, cette fois-ci dans le plan ZY (Figure 6.5). Dans ce plan, la hauteur du cordon est égale à l'épaisseur de la couche  $d = 30 \mu m$ . Ainsi, on observe sur Figure 6.4 et Figure 6.5 que les rayons au

début du cordon sont plus aplatis que les rayons de la fin. Les rayons de fin créent une surface avec un grand nombre de particules de poudre intégrées.

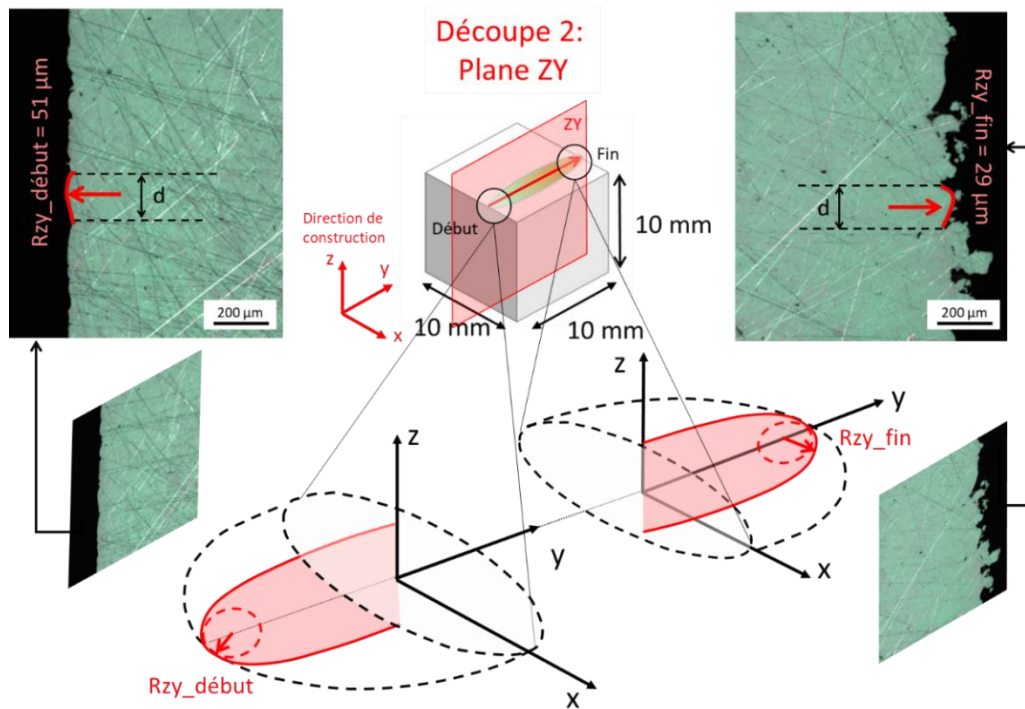


Figure 6.5 – Mesure du début et de la fin des cordons dans le plan ZY

Enfin, dans le plan XZ, le côté du cordon est mesuré (Figure 6.6). La hauteur du cordon est égale à l'épaisseur de couche. Une fois que les données expérimentales sont collectées, il est possible de passer à la modélisation.

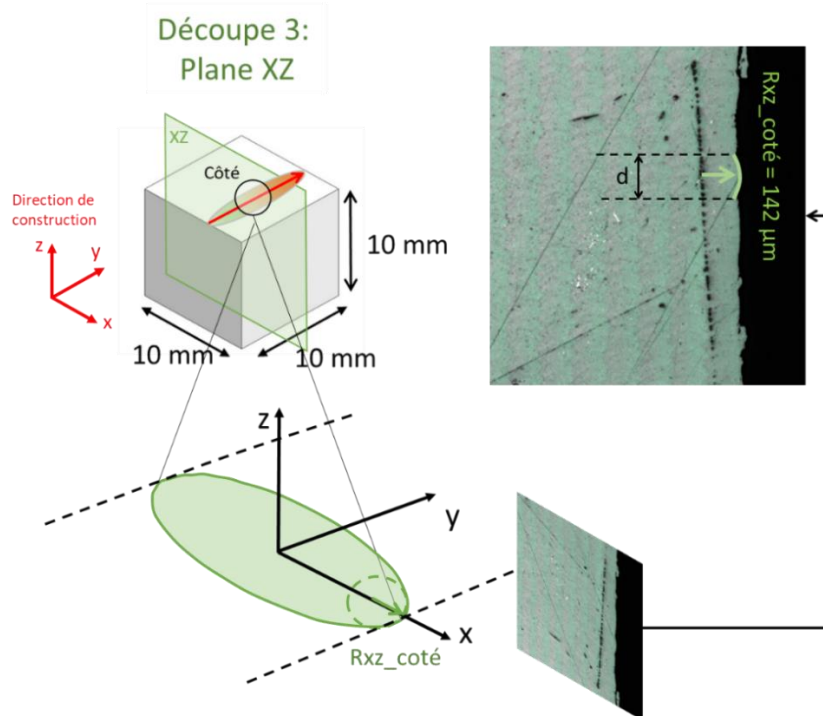


Figure 6.6 – Mesure du côté des cordons dans le plan XZ

## 6.2. Démarche générale de modélisation

La démarche de modélisation comprend deux étapes:

- Dans un premier temps, la modélisation sous forme d'ellipsoïdes de cordons simples à partir des mesures expérimentales effectuées en 6.1;
- Deuxièmement, la combinaison et le positionnement de ces cordons les uns par rapport aux autres pour générer une surface latérale modélisée.

### 6.2.1. Modélisation de mono cordons

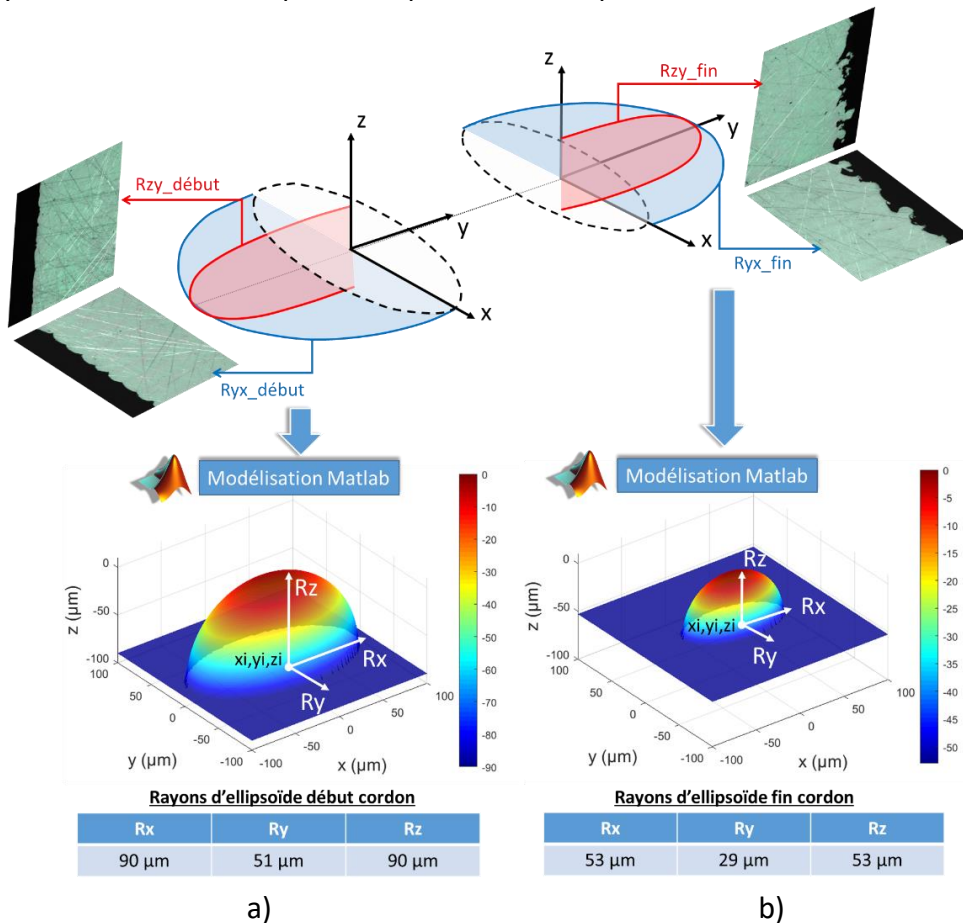
Mathématiquement, la forme du cordon peut être décrite à l'aide d'une fonction d'ellipsoïde. L'équation d'une ellipsoïde est représentée comme suit :

$$\frac{(x - x_i)^2}{R_x^2} + \frac{(y - y_i)^2}{R_y^2} + \frac{(z - z_i)^2}{R_z^2} = 1 \quad (17)$$

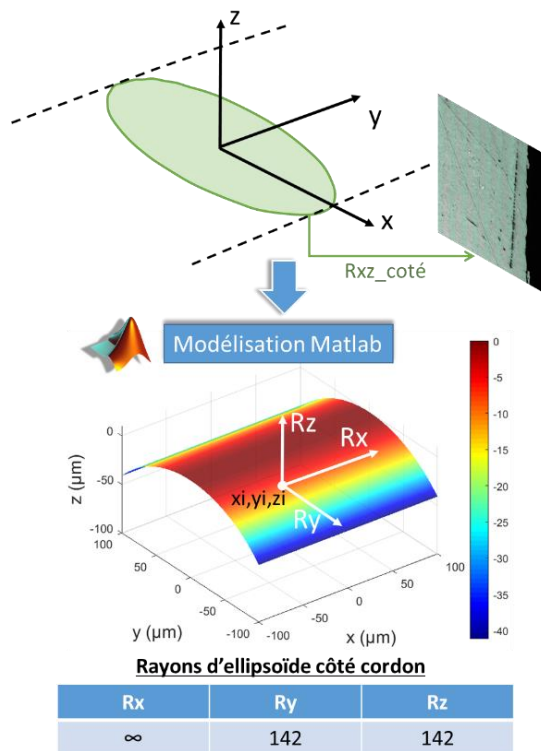
D'où z :

$$z = R_z \sqrt{1 - \frac{(x - x_i)^2}{R_x^2} - \frac{(y - y_i)^2}{R_y^2}} + z_i \quad (18)$$

Où  $x_i$ ,  $y_i$ , et  $z_i$ , sont les coordonnées cartésiennes selon  $x$ ,  $y$ ,  $z$  déterminant la position du centre de chaque ellipsoïdes dans un espace donné;  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  sont les rayons des cordons adaptés à l'équation de l'ellipsoïde.







c)

Figure 6.7 – Modélisation d'un mono cordon à l'aide d'une fonction ellipsoïde basée sur les valeurs de rayon de courbure expérimentales: a) début de cordon; b) fin de cordon; c) côté de cordon

De cette façon, le début, la fin et le côté du cordon peuvent être modélisés dans Matlab (Figure 6.7).

### 6.2.2. Combinaison de plusieurs cordons

#### Détermination de la dimension de la surface modélisée

Il faut maintenant déterminer la position des mono cordons les uns par rapport aux autres. Pour ce faire, une dimension de la surface modélisée est d'abord déterminée. Afin de pouvoir comparer le modèle développé avec les données expérimentales, les dimensions de la surface modélisée sont identiques aux dimensions des surfaces mesurées expérimentalement dans les chapitres précédents (3 mm par 2 mm). Cela donne donc une longueur de l'axe  $x$  égale à  $Lx = 3000 \mu m$  et une longueur de l'axe  $y$  égale à  $Ly = 2000 \mu m$  (Figure 6.8). L'origine du repère  $\langle O, x_0, y_0, z_0 \rangle$  est le centre de la surface modélisée.



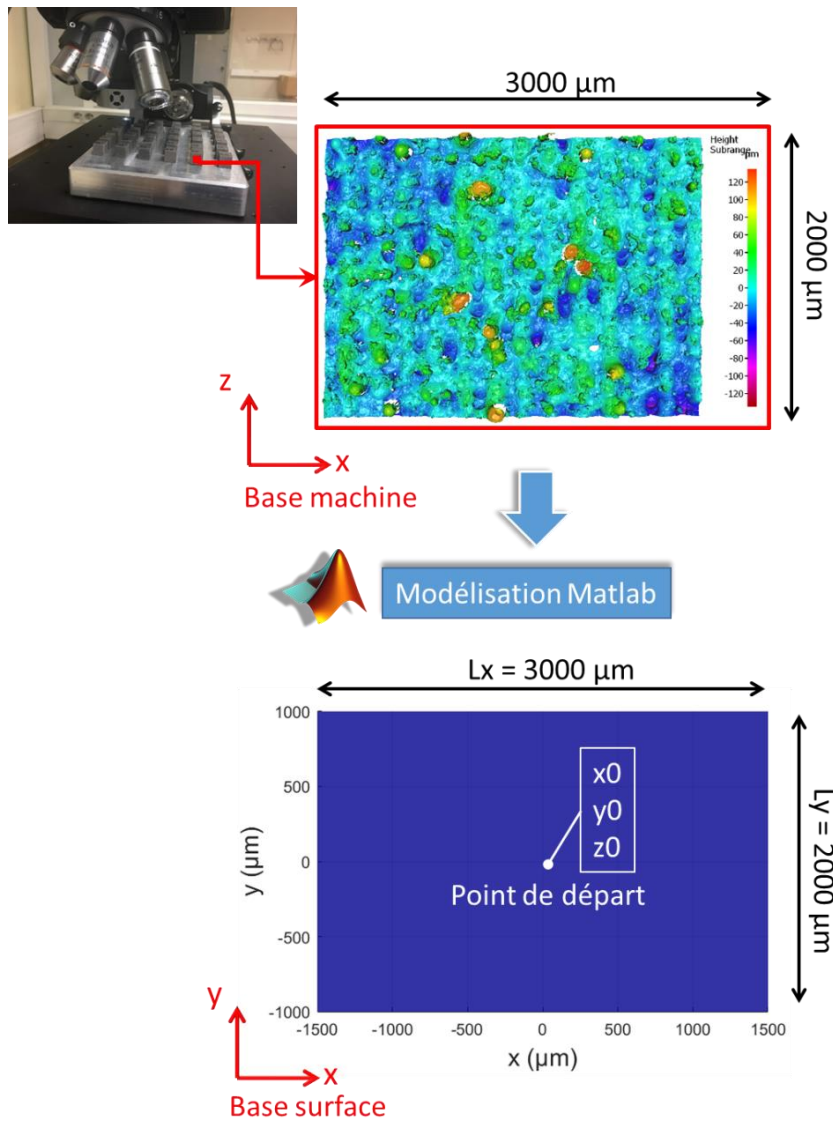


Figure 6.8 – Détermination de la dimension de la surface modélisée et de l'origine

### Définition du décalage de l'axe Z

Les décalages possibles des cordons le long de l'axe  $z$ , ainsi que les axes  $x$  et  $y$  (voir ci-dessous), sont présentés sur la Face 1 de l'échantillon avec une stratégie de fusion « Aller-retour croisée » (Figure 6.9).

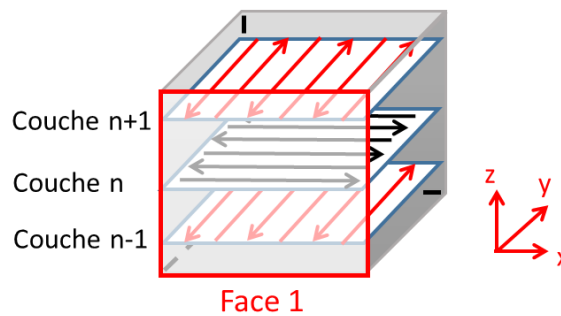


Figure 6.9 – Face 1 de la stratégie « Aller-retour croisée »

Le décalage de l'axe  $z$  comporte deux delta différents selon la couche considérée:

- $\Delta Z1$  est la différence entre les positions de départ et d'arrêt du vecteur de fusion (Figure 6.10) pour les couches  $n-1$  et  $n+1$ .  $\Delta Z1$  est donc défini comme la différence entre le point « Début » et le point « Fin »:  $\Delta Z1 = \text{Début} - \text{Fin}$  (la compensation Chapitre 5);
- $\Delta Z2$  est la différence entre la position de couche  $n-1$  ou  $n+1$  (fin et début des cordons) et de couche  $n$  (côté du cordon) (Figure 6.11).

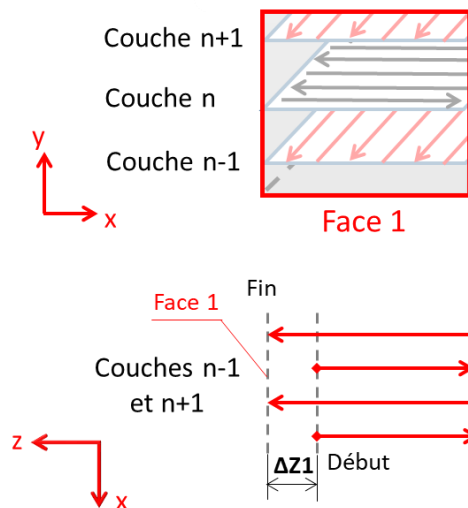


Figure 6.10 – Définition du  $\Delta Z1$  comme la distance entre le début et la fin des vecteurs de balayage

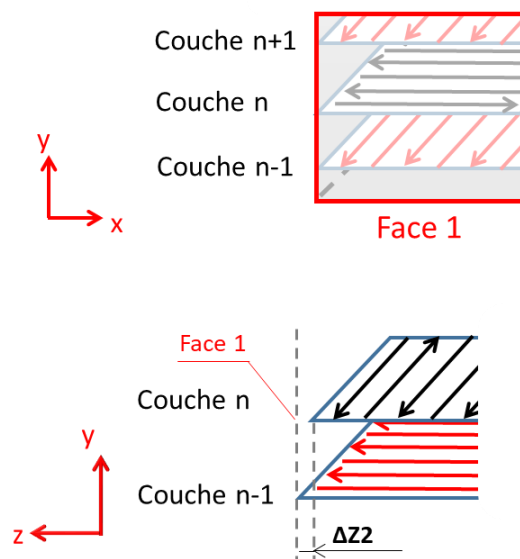


Figure 6.11 – Définition du  $\Delta Z2$  comme la différence entre la position de couche  $n-1$  et couche  $n$

### Détermination de la position horizontale, l'axe $x$

Le nombre de cordons sur la largeur de surface est déterminé par le rapport entre la longueur  $Lx$  de l'axe  $x$  et l'écart vecteur  $h$ :  $N_{vecteur} = Lx/h$ . Il y a donc  $N_{vecteur} = 21.4$

cordons en position horizontale (voir Figure 6.12). Supposons que la combinaison de vecteurs de fusion commence dans le coin inférieur gauche avec l'ellipsoïde de fin cordon. Le premier cordon a alors les coordonnées  $(-Lx/2 + h/2; -Ly/2 + d/2; \Delta Z1)$ . Ensuite, la position de chaque cordon suivant est décalée le long de l'axe  $x$  de la distance d'écart vecteur  $h$ . Le déplacement selon l'axe  $z$  est  $\Delta Z1$ , car il s'agit de la couche  $n-1$  (compensation). Il peut prendre des valeurs négatives  $\Delta Z1 < 0$  positives  $\Delta Z1 > 0$  ou être égal à zéro  $\Delta Z1 = 0$ .

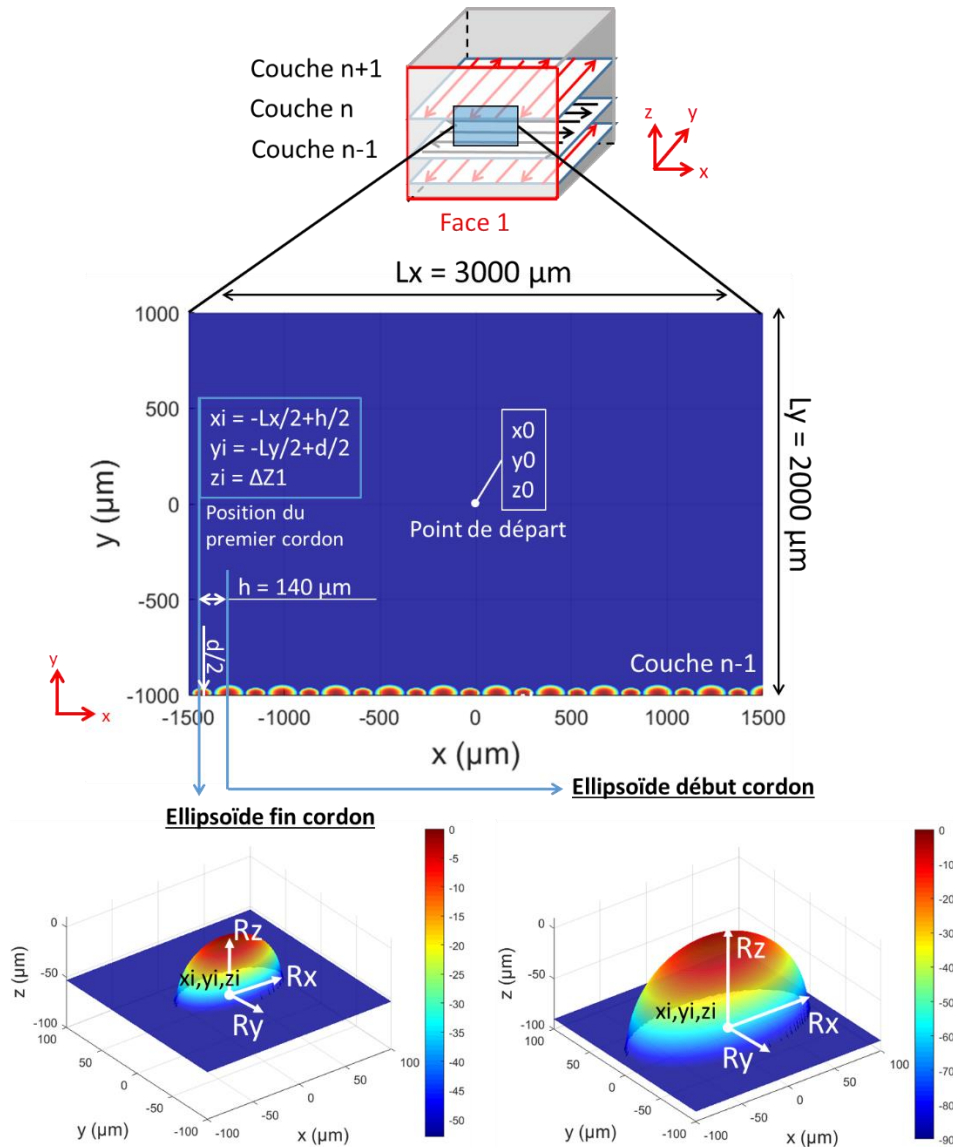


Figure 6.12 – Combinaison de cordons le long de l'axe  $x$  pour Face 1 de la stratégie « Aller-retour croisée »

### Détermination de la position latérale, l'axe $y$

Dans la direction latérale, la position entre les cordons, ou plutôt les couches, est déterminé par l'épaisseur de la couche  $d$  (Figure 6.13). Le nombre de couches dans la hauteur de la surface est déterminé par le rapport entre la longueur  $Ly$  de l'axe  $y$  et l'épaisseur de la couche  $d$ :  $N_{couche} = Ly/d$ . Il y a donc  $N_{couche} = 66.7$  couche. En conséquence, le nombre total de cordons, pour chaque surface modélise, est égale  $n =$

$N_{vecteur} \cdot N_{couche} = 21.4 \cdot 66.7 = 1407$ . Le déplacement selon l'axe  $z$  est  $\Delta Z2$ , la différence entre la position de couche  $n-1$  (fin et début des cordons) et de couche  $n$  (côté du cordon). De cette manière, la position des cordons pour chaque face de l'échantillon est déterminée en fonction de la stratégie et des conditions de fusion.

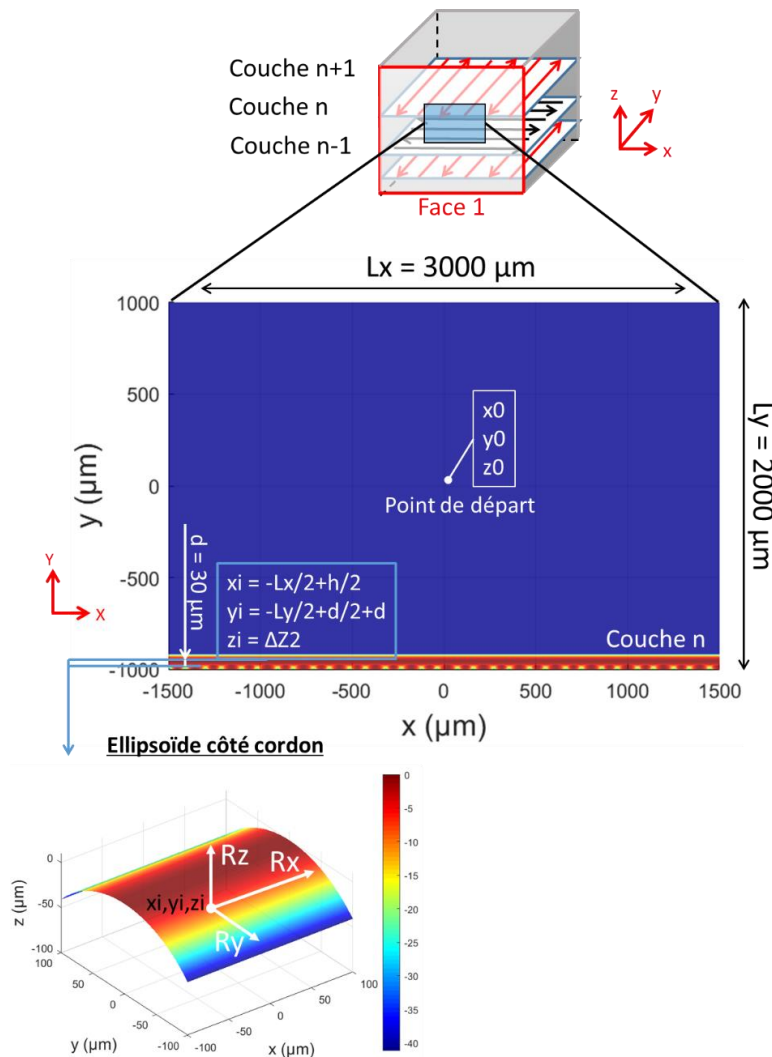


Figure 6.13 – Combinaison de cordons le long de l'axe  $y$  pour Face 1 de la stratégie « Aller-retour croisée »

Après avoir déterminé la position de chaque cordon, il est possible de procéder au calcul de la rugosité  $S_a$ . Un code est généré qui enlève la forme de la surface modélisée d'origine à l'aide d'un polynôme du second ordre (comme dans l'analyse expérimentale). La méthode des moindres carrés est utilisée. Les paramètres de rugosité surfaciques sur la surface avec la forme enlevée sont ensuite calculés.

### 6.3. Validation du modèle avec les résultats expérimentaux

Le modèle final peut maintenant être confronté aux données expérimentales. Pour cela, les surfaces suivantes (modélisées et obtenues expérimentalement) ont été comparées:

- Toutes les faces de la stratégie « Aller simple » (section 6.1.1)

- Toutes les faces dans l'analyse de la dispersion de la rugosité sur un échantillon (section 4.3)
- Face 1 de chaque échantillon avec différentes valeurs de la compensation (section 5.1.3)

**Stratégie « Aller simple » (section 6.1.1)**

Comme évoqué précédemment, un échantillon avec une stratégie à sens unique « Aller simple » a des faces qui ont seulement le début (Face 1) et seulement la fin (Face 3) des cordons. Les autres faces (Face 2 et Face 4) sont formées par le côté du cordon (Figure 6.14).

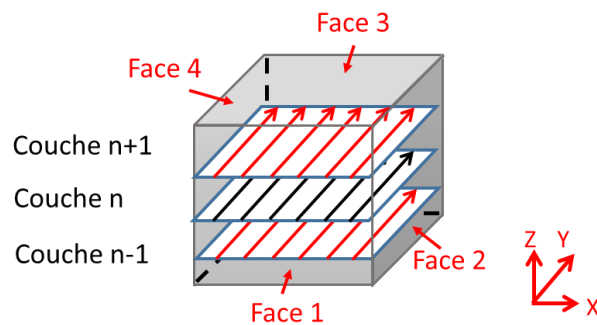


Figure 6.14 – Échantillon avec la stratégie « Aller simple » avec différentes faces pour la modélisation

Par conséquent, lors de la modélisation, il faut tenir compte du fait que la Face 1 et la Face 3 n'ont pas d'écart  $\Delta Z2$  entre la couche n-1 et la couche n. Tandis que l'écart  $\Delta Z1$  pour ces surfaces est zéro (Figure 6.15) d'après les paramètres procédés choisis. D'autre part, les Face 2 et 4 excluent la présence d'écart  $\Delta Z1$ , car ils n'ont que le côté des cordons. L'écart  $\Delta Z2$  entre la couche n-1 et couche n est égal à zéro (Figure 6.16).

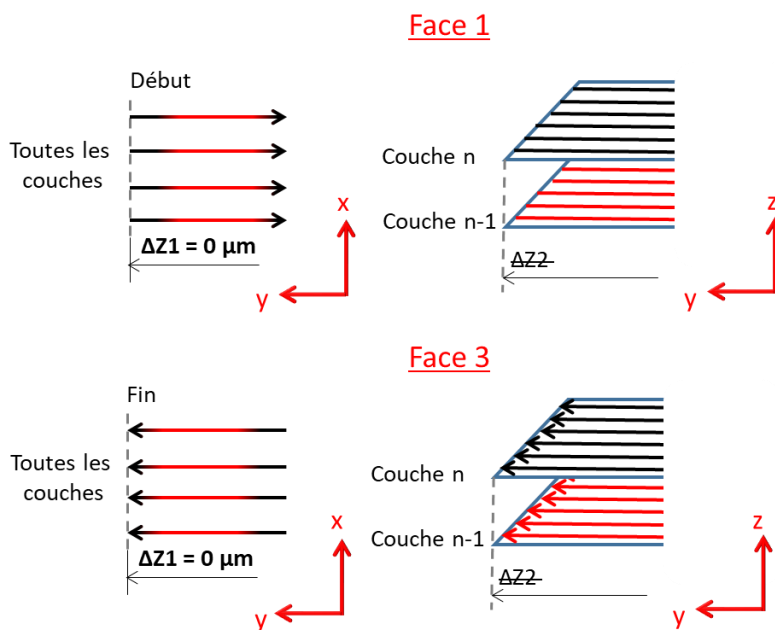


Figure 6.15 – Définition des écarts  $\Delta Z1$  et  $\Delta Z2$  pour les Faces 1 et 3

Face 2 et Face 4

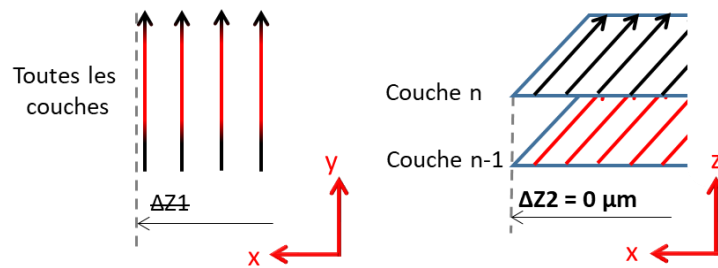


Figure 6.16 – Définition des écarts  $\Delta Z1$  et  $\Delta Z2$  pour les Faces 2 et 4

La Figure 6.17 montre donc les valeurs de rugosité  $Sa$  obtenues expérimentalement (en bleu) et modélisées (orange) pour chaque face de l'échantillon. La rugosité  $Sa$  simulée pour la face 1 est donc proche de la valeur réelle. Les différences sont probablement liées à quelques particules attachées sur la surface réelle (Figure 6.18 a et b). Cependant, pour les Faces 2, 3 et 4, la différence entre les valeurs est presque doublée.

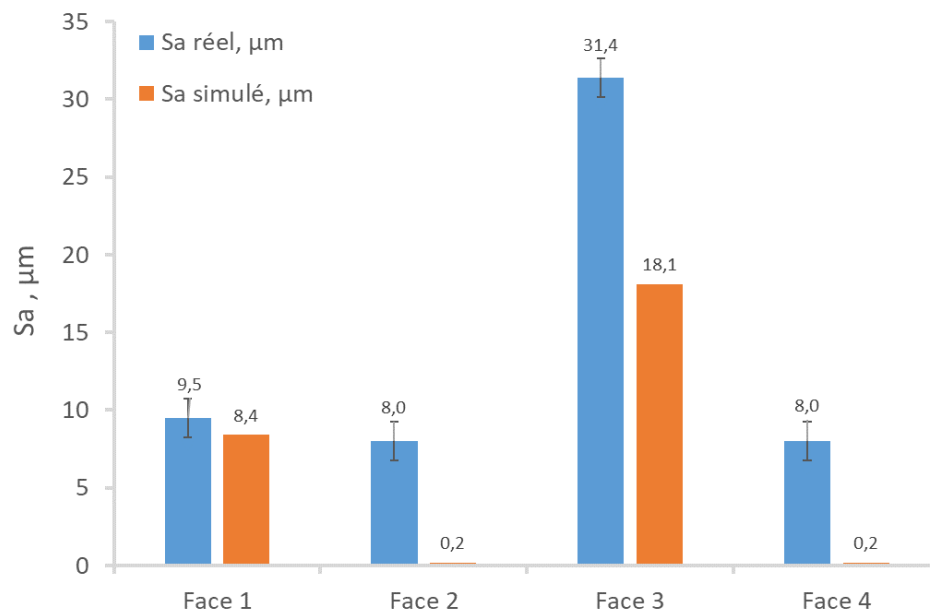
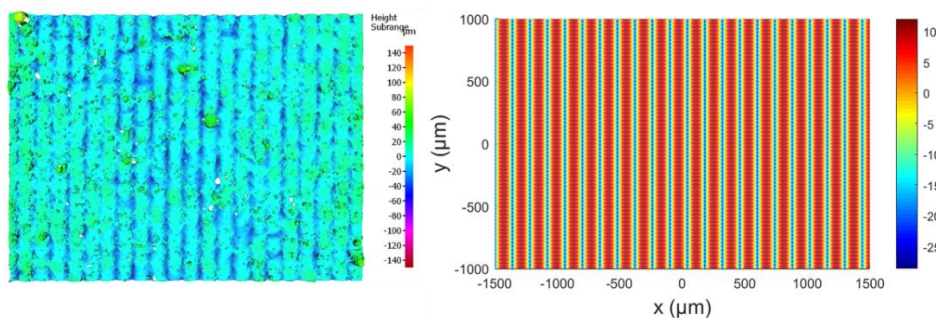


Figure 6.17 – Comparaison des valeurs de rugosité expérimentales avec les valeurs modélisées pour la stratégie « Aller simple »



a) Face 1 réelle :  $Sa=9.5 \mu\text{m}$

b) Face 1 simulée :  $Sa=8.4 \mu\text{m}$



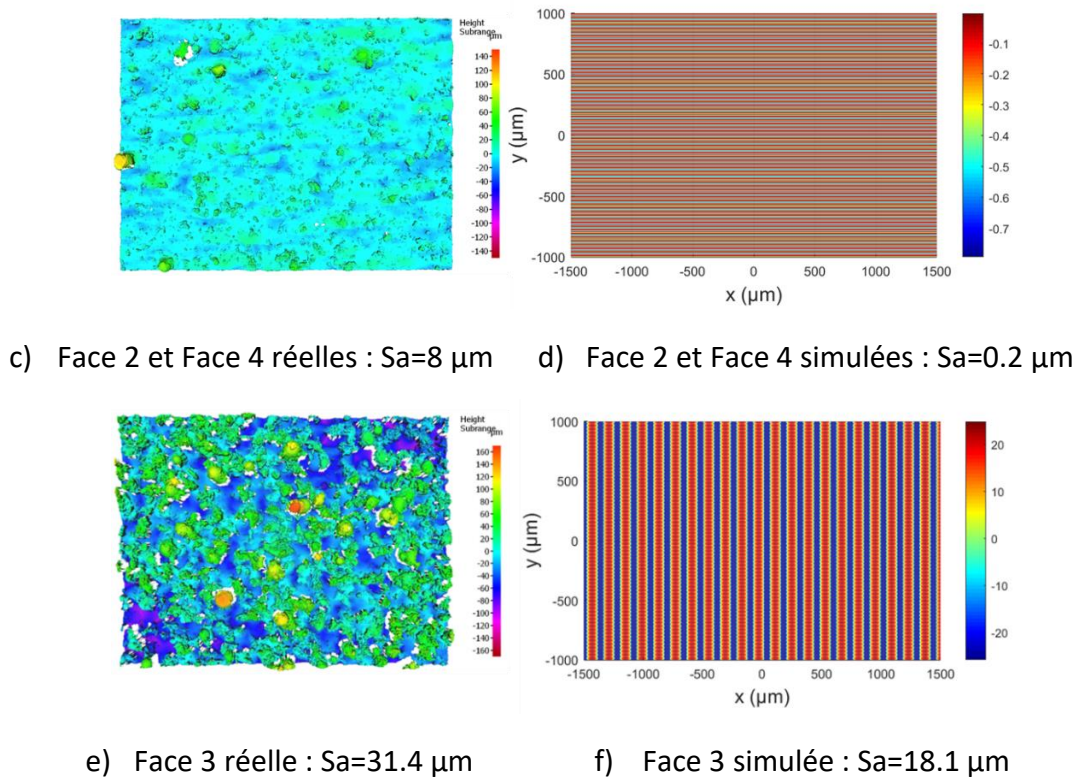


Figure 6.18 – Topographies de surfaces réelles et simulées

Il est important de noter que le modèle numérique ne tient pas compte de certains phénomènes physiques qui se produisent au cours du procédé LPBF (particules attachées, balling, rippling, instabilités du cordon etc.). Par conséquent, les Face 2 et 4 simulées ont des cordons droits (Figure 6.18), et il n'y a pas de particules de poudre attachées sur la Face 3 (Figure 6.18). Malgré cela, les tendances sont en adéquation avec l'expérimental : par exemple, l'état de surface de la face 3 est plus rugueux que celui de la face 1 aussi bien d'un point de vue expérimental que théorique.

#### **Dispersion de la rugosité sur différentes faces d'un échantillon (section 4.3)**

Dans la partie expérimentale de la thèse, une analyse de la dispersion de la rugosité sur un échantillon a montré une différence significative entre les faces 1/2 et les faces 3/4 (cf. section 4.3). Il a été suggéré que la raison de ces différences est que la taille du cube ( $10 \times 10 \text{ mm}$ ) n'est pas un multiple de  $h = 140 \mu\text{m}$ . Il semble donc intéressant de modéliser ces surfaces à l'aide du modèle développé et de comparer les résultats obtenus.

Les principaux paramètres de modélisation sont les suivants :

- Echantillon avec la stratégie « Aller-retour croisée » (Figure 6.19).
- Les Faces 1 et 2 ont un écart  $\Delta Z2 = -60 \mu\text{m}$  (Figure 6.20a) et les Face 3 et 4 ont un écart  $\Delta Z2 = 0 \mu\text{m}$  (Figure 6.20b)
- Toutes les faces ont une compensation standard  $\Delta Z1 = -20 \mu\text{m}$  (Figure 6.20 a et b).

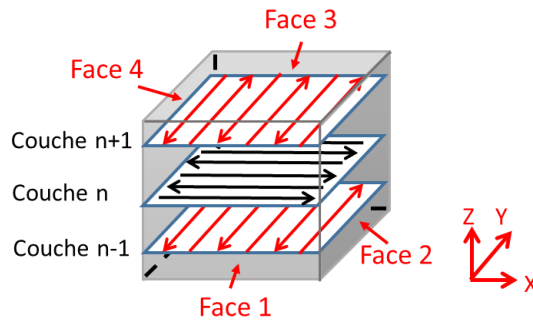


Figure 6.19 – Échantillon avec la stratégie « Aller-retour croisée » pour la modélisation de la dispersion de la rugosité sur différentes faces

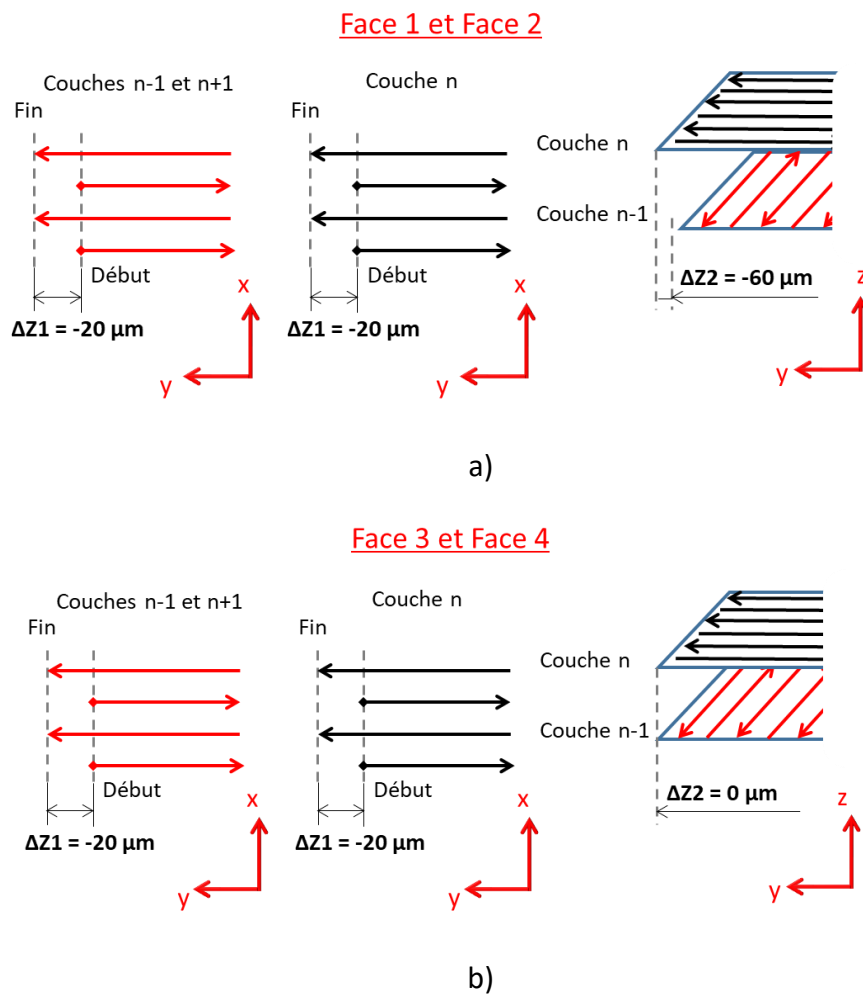


Figure 6.20 – Définition des écarts  $\Delta Z1$  et  $\Delta Z2$ : a) pour les faces 1 et 2; b) pour les faces 3 et 4

La Figure 6.21 montre la même tendance dans le changement des valeurs de rugosité d'une face à l'autre, bien que les valeurs simulées soient inférieures aux valeurs réelles. Ceci confirme l'hypothèse selon laquelle le déplacement de la couche n-1 (ou n+1) vers l'intérieur dégrade significativement la qualité des faces 1 et 2 ( $Sa_{réel} \approx 21 \mu m$  et  $Sa_{simulé} = 18.5 \mu m$ ) en exposant les couches n. La couche n a une compensation négative  $\Delta Z1 = -20 \mu m$ , ce qui signifie que la fin du cordon est plus grande que son



début. En revanche, pour les Faces 3 et 4, la couche n-1 (ou n+1) masque la fin des cordons de la couche n et réduit la rugosité à  $Sa_{réel} \approx 13 \mu\text{m}$  en conditions expérimentales et à  $Sa_{simulé} = 3.5 \mu\text{m}$  en simulation. Là encore, le modèle ne prend pas en compte les particules de poudre attachées.

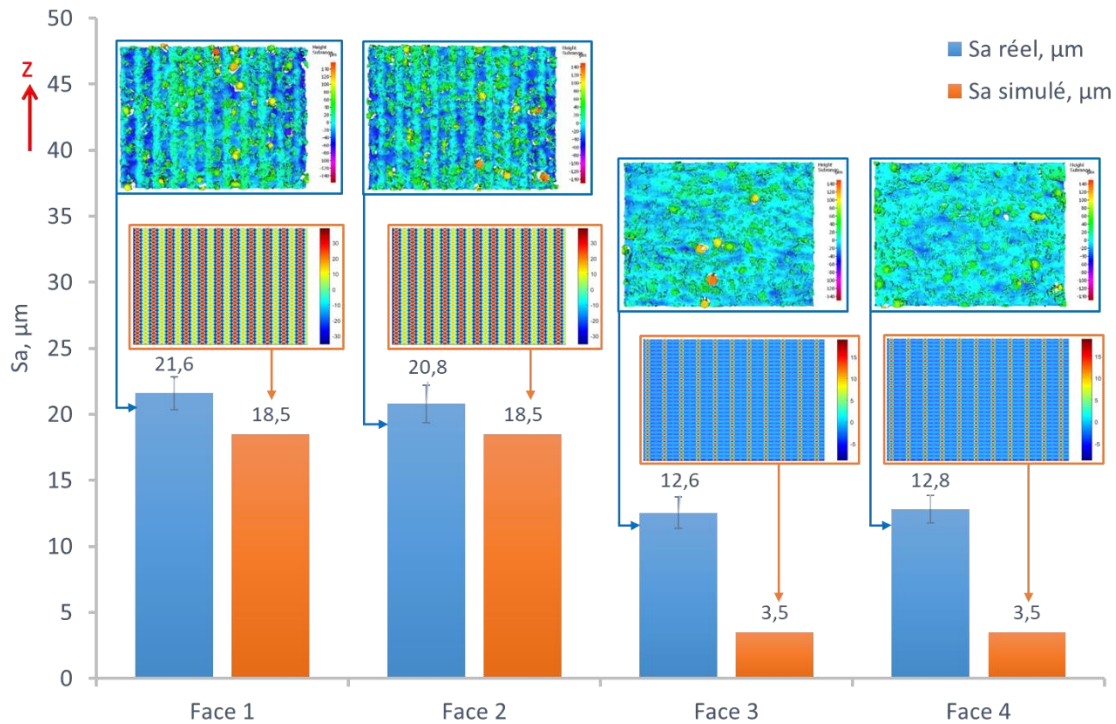


Figure 6.21 – Comparaison des valeurs de rugosité réelles et simulées pour l'analyse de dispersion des différentes faces d'un cube produit

### **Compensation (section 5.1.3)**

Une autre étape importante de la comparaison est l'effet des différents paramètres de compensation  $\Delta Z1$ . Par conséquent, le modèle est comparé aux résultats obtenus au Chapitre 5 où la dépendance de la rugosité latérale sur la fonction  $\Delta$  a été présentée. Seule la face 1 de l'échantillon avec la stratégie « Aller-retour croisée » est considéré (Figure 6.22). Les valeurs de compensation, pour les couches n-1 et n+1, varient selon les paramètres procédés expérimentaux définis au Chapitre 5. L'écart  $\Delta Z2$  entre les couches n-1 et n est constant et égal à  $-60 \mu\text{m}$  (Figure 6.23).

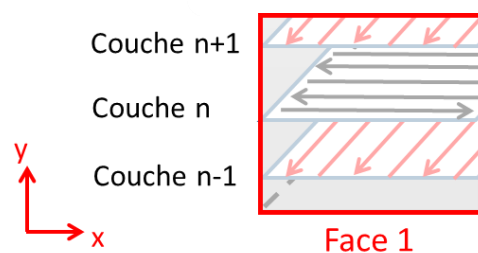
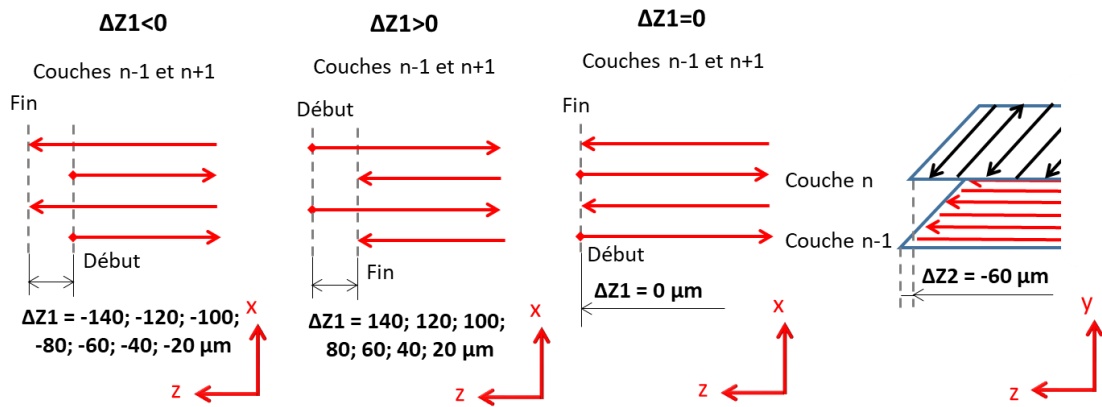
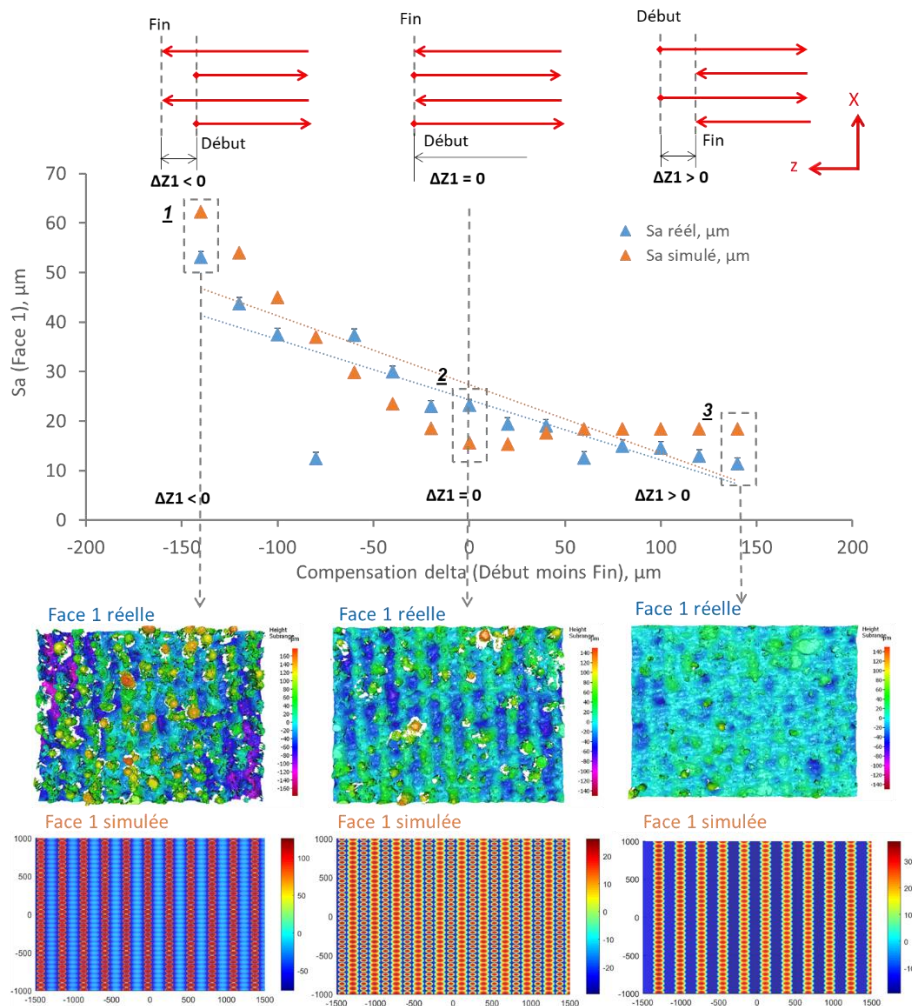


Figure 6.22 – Face 1 de la stratégie « Aller-retour croisée » choisie pour l'analyse de la compensation

### 6.3. Validation du modèle avec les résultats expérimentaux



La Figure 6.24 montre la même tendance de rugosité entre les valeurs expérimentales et simulées et confirme que le  $Sa$  diminue linéairement avec l'augmentation de  $\Delta Z1$ . Ceci est clairement visible lors de la comparaison de la topographie de trois échantillons différents du lot : i)  $\Delta Z1 = -140 \mu\text{m}$ , ii)  $\Delta Z1 = 0 \mu\text{m}$ , et iii)  $\Delta Z1 = 140 \mu\text{m}$ . En outre, un delta positif  $\Delta Z1 > 0$  stabilise également la valeur de la rugosité  $Sa$  simulée.



En résumé, le modèle numérique développé est en cohérence avec les résultats expérimentaux. Cependant certains phénomènes physiques ne sont pas pris en compte (balling, particules attachées, instabilité de cordon). Ceci confirme la prédominance des aspects géométriques des cordons sur la qualité des surfaces générées.

#### 6.4. Étude de sensibilité du modèle

Une étude de sensibilité du modèle est aussi considérée afin d'identifier des paramètres procédés pouvant avoir une influence significative. Cette étude s'effectue en modifiant certains paramètres de la façon suivante :

- Augmentation et diminution de 30% des rayons  $R_x$ ,  $R_y$  et  $R_z$  de début et de fin de cordons;
- Augmentation et diminution de 30% de l'écart vecteur  $h$  et de l'épaisseur de la couche  $d$ .

Cela permettra d'évaluer le comportement du modèle lorsque les paramètres primaires du procédé sont modifiés. La Face 1 de la stratégie « Aller-retour croisée » avec des écarts  $\Delta Z1 = 0 \mu m$  et  $\Delta Z2 = -60 \mu m$  est sélectionnée pour cette étude (Figure 6.25). La valeur référence de la rugosité de cette surface est égale à  $Sa = 15.6 \mu m$ .

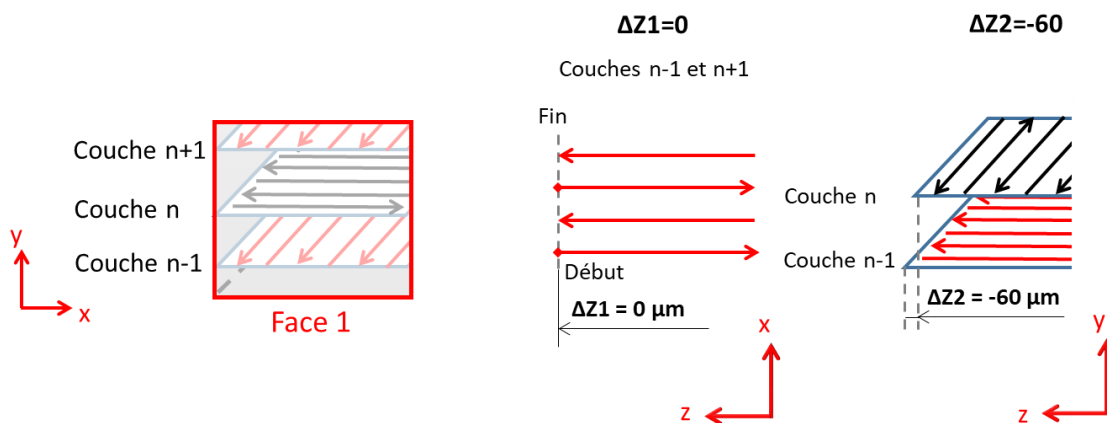


Figure 6.25 – Face 1 avec des écarts  $\Delta Z1$  et  $\Delta Z2$  sélectionnée pour l'étude de sensibilité du modèle

De ce fait, les résultats du modèle sont comparés au graphique obtenu au Chapitre 5 où la dépendance de la rugosité latérale sur la fonction  $\Delta$  a été obtenue expérimentalement. La Figure 6.26 montre que lorsque les rayons du début de cordons augmentent de 30%, la rugosité de surface diminue de 15%. Inversement, lorsque les rayons de départ sont réduits de 30%, la rugosité de surface augmente de 15%. Cela confirme que les extrémités plates des cordons produisent une meilleure qualité de surface. D'autre part, l'augmentation des rayons de cordons réduit la rugosité de 15 %, ce qui est logique. Toutefois, si les rayons sont réduits de 30%, la rugosité n'augmente pas mais diminue de 20% (Figure 6.27). Les rayons de fins sont alors cachés par les rayons de début de cordon.

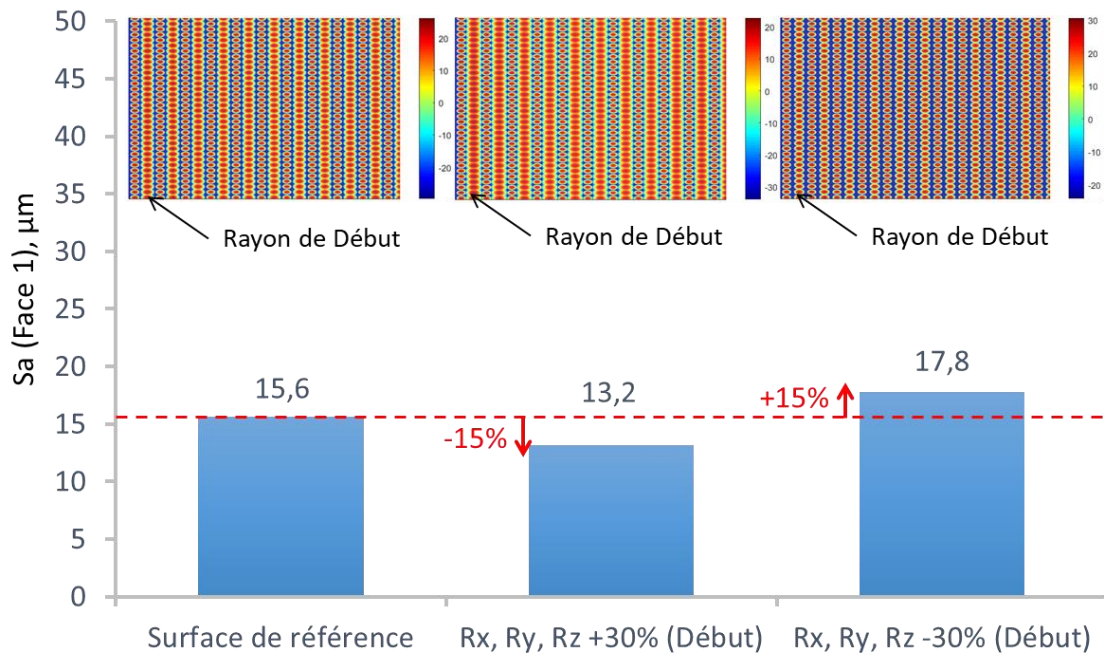


Figure 6.26 – Influence de la taille du rayon du début sur la variation de la rugosité de surface

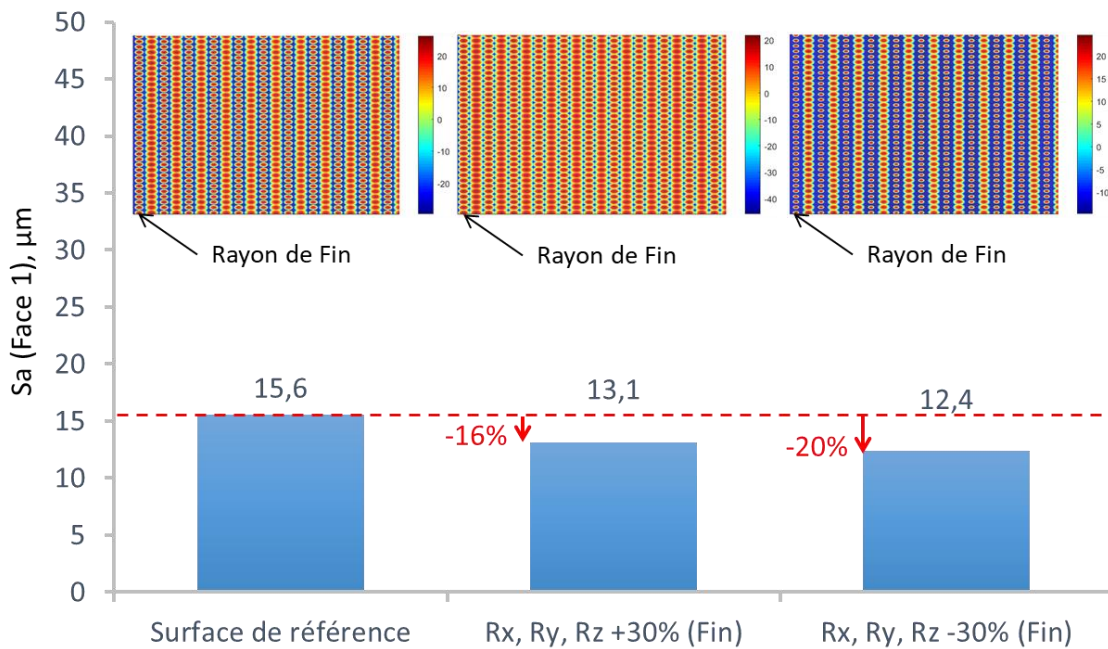


Figure 6.27 – Influence de la taille du rayon de la fin de cordon sur la rugosité de surface

L'ajustement de l'écart vecteur est également significatif. Il ne montre pas une forte augmentation de la rugosité, environ 17%, avec une augmentation de l'écart vecteur de 30%. Mais, avec une réduction de 30%, la rugosité est considérablement réduite de 93% (Figure 6.28). L'écart vecteur affecte la forme du chevauchement entre les rayons des cordons et rend la surface plus plate en raison de sa réduction [19,43]. Cependant l'augmentation de température (et les conséquences induites) provoquée par l'utilisation d'un petit écart vecteur ne sont pas pris en compte par ce modèle.



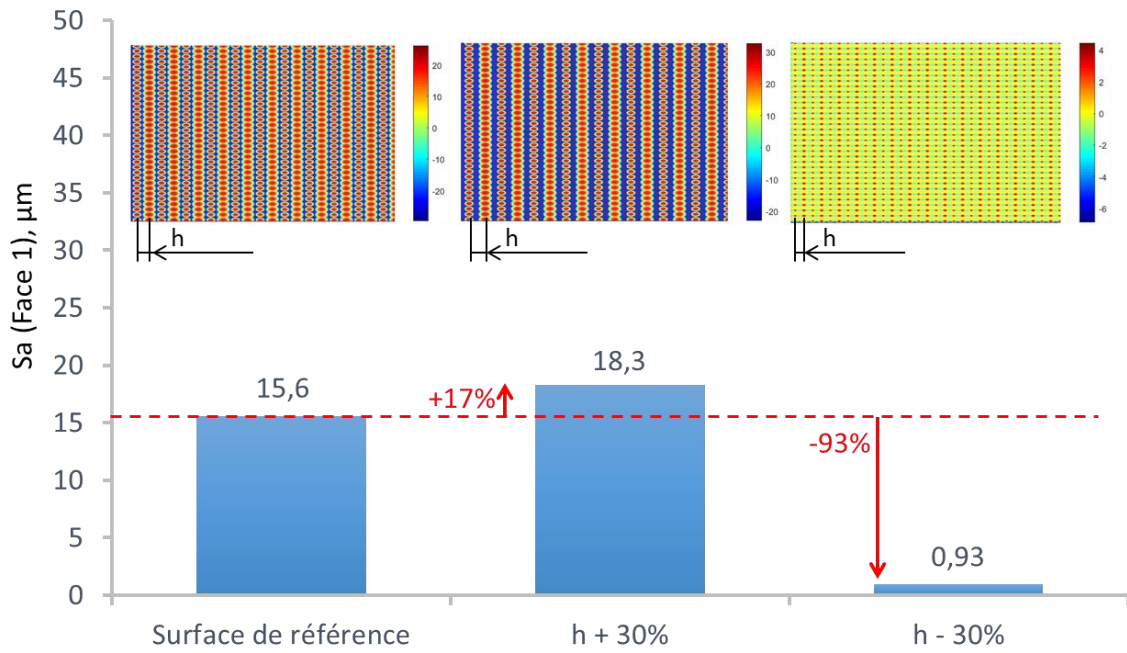


Figure 6.28 – Influence de la taille d'écart vecteur sur la rugosité de surface

Enfin, en examinant l'ajustement de l'épaisseur de la couche, on constate qu'un changement de 30% a un effet négligeable sur la rugosité des surfaces verticales (Figure 6.29). Ainsi, avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche, la rugosité augmente de 8%, et diminue de 11% pour les couches plus fines.

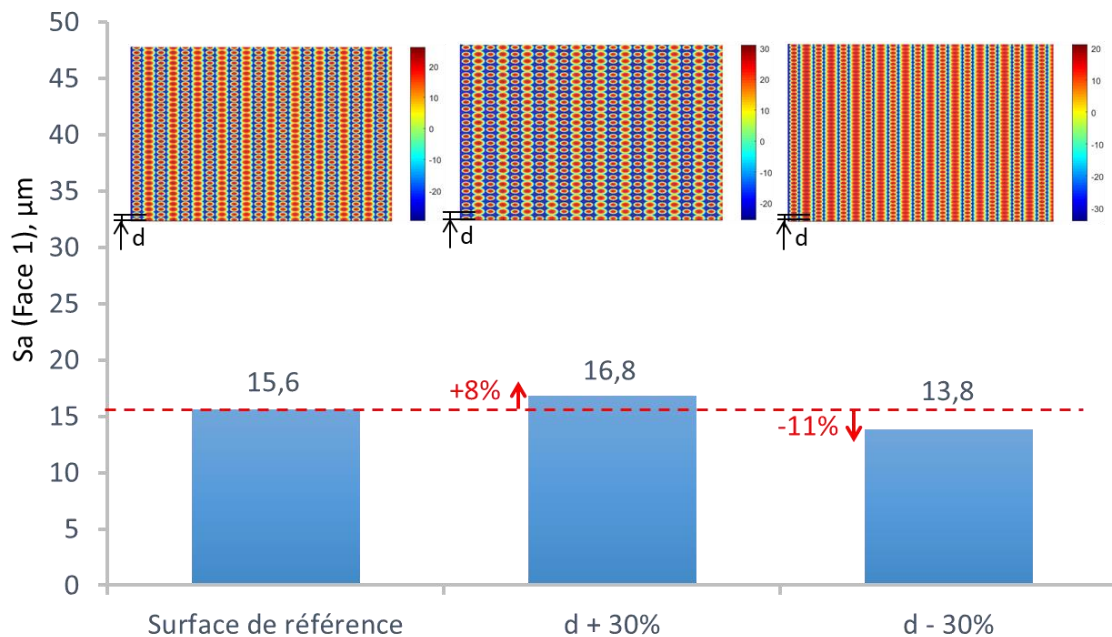


Figure 6.29 – Influence de la taille de l'épaisseur de la couche sur la rugosité de surface

## 6.5. Conclusions

Dans ce chapitre, une nouvelle approche de modélisation des surfaces a été présentée. Un modèle numérique est donc développé sur la base de cette approche. La nouveauté de cette approche est que les paramètres d'entrée du modèle sont les valeurs moyennes des rayons de courbure des cordons: rayon de début, rayon de fin et rayon de côté. En outre, le modèle permet de prendre en compte la position des cordons (ajuster l'écart vecteur  $h$  et le décalage  $\Delta Z1$ ) et des couches (ajuster l'épaisseur de couche  $d$  et décalage  $\Delta Z2$ ) les uns par rapport aux autres et ainsi prédire la rugosité pour différentes stratégies de lasage, paramètres de compensation.

Le modèle développé est cohérent avec les mesures expérimentales et retranscrit les tendances principales observées expérimentalement.

Le modèle a permis également de tester la sensibilité de la rugosité en fonction de certains paramètres d'entrée. Il est notamment observé qu'une diminution de l'écart vecteur peut engendrer une diminution significative de la rugosité. A l'inverse l'épaisseur de couche a une plus faible influence sur la rugosité finale. Cependant ces résultats ne tiennent pas compte d'éventuels effets thermiques indésirables.

Enfin le modèle ne considère pas l'impact sur la topographie de surface de phénomènes physiques tels que les particules attachées, l'effet balling, la surchauffe. En perspective, il est prévu d'améliorer le modèle en ajoutant l'effet escalier et les phénomènes physiques présentés ci-dessus.



# Conclusion générale

---

Cette thèse présente des études visant à comprendre la génération des surfaces produites par le procédé de fusion laser sur lit de poudre (LPBF). Ces études abordent un défi important du procédé LPBF. En effet les rugosités élevées des surfaces générées en LPBF limitent l'utilisation du procédé pour la production de composants à fortes exigences. La thèse se concentre sur l'étude des surfaces latérales bien moins accessibles pour d'éventuels post traitements. Le matériau utilisé est un alliage d'aluminium AlSi10Mg très utilisé par l'industrie aéronautique en raison de ses propriétés (légèreté, malléabilité, faible coût).

Par conséquent, ce travail de thèse comprend:

## **Étude d'influence des paramètres primaires sur la rugosité latérale et la densité des pièces**

Cette étude se concentre sur l'effet des paramètres de base du procédé LPBF sur les propriétés des pièces finales, notamment la densité et la rugosité des surfaces créées. Les paramètres de base du procédé LPBF sont la puissance du laser ( $P$ , W), la vitesse de fusion ( $V$ , mm/s), l'écart vecteur ( $h$ ,  $\mu\text{m}$ ), l'épaisseur de couche ( $d$ ,  $\mu\text{m}$ ).

Les résultats obtenus pendant une première campagne permettent de conclure qu'une puissance de 100W n'est pas suffisante pour faire fondre la poudre d'aluminium et obtenir des cordons stables (effet balling).

La deuxième campagne d'expériences (puissance variant entre 200 et 300 W) a permis de définir une fenêtre de paramètres optimaux (LED entre 0.26 et 0.33 J/mm) pour la génération des cordons réguliers et stables. Ensuite, la recherche d'une fenêtre de paramètres à l'échelle du cube est réalisée. Les conditions optimales suivantes sont obtenues:  $P = 260$  W,  $V = 1000$  mm /s et  $h = 140$   $\mu\text{m}$ ) avec VED 61.9 J/mm<sup>3</sup>. Ces conditions sont ensuite appliquées comme base pour le reste de l'étude.

## **Analyse de la dispersion de la rugosité des surfaces latérales**

Dans la littérature, les dispersions de la topographie de surface dues au procédé LPBF sont rarement étudiées. Or, pour observer l'influence des paramètres du procédé il est important de s'assurer qu'une variation est significative ou non. L'étude de la dispersion des valeurs de rugosité est donc primordiale. Par conséquent, après la première optimisation, une étude de dispersion est réalisée pour évaluer la reproductibilité du procédé. La dispersion de rugosité est analysée à différentes échelles: (i) reproductibilité sur différents plateaux; (ii) reproductibilité pour différents emplacements sur un même plateau; (iii) dispersion pour différentes faces d'un même échantillon (iiii) dispersion sur la même face.

Cette analyse montre que les variations de rugosité d'un plateau à l'autre peuvent être assez faibles mais dépendent fortement de l'emplacement sur le plateau. La rugosité moyenne  $S_a$  peut varier jusqu'à 5  $\mu\text{m}$  avec un écart type  $\sigma = 1,24$   $\mu\text{m}$ , sur un même plateau. En ce qui concerne les différences de rugosité moyenne d'une face à



l'autre, elles sont significatives et peuvent atteindre jusqu'à  $9 \mu\text{m}$  ( $\sigma = 4,9 \mu\text{m}$ ). Cela est dû au fait que la taille de l'échantillon n'est pas un multiple de l'écart vecteur, ce qui entraîne des configurations de cordons différentes sur chaque face. Il est donc recommandé de toujours mesurer la même face de l'échantillon à des fins de comparaison. Ceci est d'ailleurs appliqué pour toute la thèse. Enfin, les dispersions de rugosité sur la même face d'un échantillon sont plutôt faibles (environ  $2 \mu\text{m}$  avec  $\sigma = 1.25 \mu\text{m}$ ). Il est recommandé de mesurer au moins sur la partie centrale de la face pour obtenir une rugosité moyenne représentative. Ceci est d'ailleurs appliqué pour toute la thèse.

### **Influence des paramètres secondaires sur la rugosité des surfaces latérales**

Cette étude permet comprendre l'effet des paramètres secondaires sur la rugosité des surfaces latérales. Les paramètres secondaires incluent : stratégie de fusion, post-scanning, compensation (positionnement des vecteurs de début et de fin) et contour.

Selon cette étude, il a été constaté que deux paramètres secondaires du procédé sont importants pour réduire la rugosité de la surface latérale: la compensation et la stratégie de contour. En observant l'influence de ces paramètres, une meilleure compréhension de la génération de surface dans le procédé LPBF peut être obtenue.

Le réglage de la compensation permet de masquer ou pas les fins de cordons (forme des irrégularités). Cela peut donc induire la génération de surfaces plus fines (jusqu'à un  $Sa$  de  $10 \mu\text{m}$ ) si les cordons de fin sont masqués. La stratégie de contour donne également une fine rugosité de surface ( $Sa$  de  $10 \mu\text{m}$ ) si le contour est réalisé avant de balayer le cœur de l'échantillon (laser traverse un lit de poudre homogène). Cependant, le réglage du contour cesse d'avoir un effet positif sur la rugosité lorsque l'angle d'inclinaison des surfaces de l'échantillon augmente.

### **Modélisation de la génération des surfaces latérales**

Cette étude propose une nouvelle approche de modélisation des surfaces latérales. La nouveauté de cette approche est que les paramètres d'entrée du modèle sont les valeurs moyennes des rayons de courbure des cordons: rayon de début, rayon de fin et rayon de côté. En outre, le modèle permet de prendre en compte la position des cordons les uns par rapport aux autres et ainsi prédire la topographie puis la rugosité pour différentes stratégies de lasage et paramètres de compensation. Ce modèle développé est cohérent avec les mesures expérimentales et retranscrit les tendances principales observées expérimentalement. Le modèle a permis également de tester la sensibilité de la rugosité en fonction de certains paramètres d'entrée, notamment l'écart vecteur et l'épaisseur de la couche. Une diminution de l'écart vecteur peut engendrer une diminution significative de la rugosité. L'épaisseur de couche a une influence plus limitée sur la rugosité.

### **Perspectives**

Le travail effectué dans cette thèse contribue à la compréhension de la génération des surfaces produites par le procédé LPBF. Elle permet de réduire la rugosité des surfaces latérales  $Sa$  de  $40$  à  $10 \mu\text{m}$ . Néanmoins, certains développements peuvent encore être nécessaires :

- La nécessité d'une caractérisation de surface plus avancée: à l'avenir, l'observation d'autres paramètres de rugosité de surface tels que  $Sq$ ,  $Sp$ ,  $Sv$ ,  $Sz$ ,  $Ssk$ ,  $Sku$ , etc. et l'utilisation d'analyses spécifiques (PSD, analyse fractale) pourraient améliorer la compréhension de la génération de topographie.
- Rugosité de surface et pièces complexes : compte tenu des différents résultats, la disposition géométrique des différents cordons est une question importante à traiter afin de réduire la rugosité de surface. Les pièces produites par LPBF sont par nature de conception complexe, et des questions importantes doivent être abordées :
  - Comment homogénéiser la rugosité d'un côté à l'autre (sans post-traitement des surfaces) ?
  - Le contour est intéressant pour les surfaces latérales verticales, mais son intérêt est limité pour les surfaces inclinées en raison de l'effet d'escalier. Un meilleur positionnement des cordons peut-il aider à réduire la rugosité des surfaces inclinés ?
- Améliorer le modèle numérique en ajoutant l'effet escalier et les phénomènes physiques telle que les particules attachées, l'effet balling et la surchauffe. Cela permettra de prédire plus précisément la rugosité des surfaces en vue d'optimisations.



# Bibliographie

---

- [1] Thomas, Marc, Cécile Davoine, and Stefan Drawin. "Fabrication additive en aéronautique et en spatial." (2019).
- [2] Liu, Renwei, et al. "Aerospace applications of laser additive manufacturing." *Laser additive manufacturing*. Woodhead Publishing, 2017. 351-371.
- [3] Arnold, Steven M., David Cebon, and Mike Ashby. "Materials selection for aerospace systems." (2012).
- [4] Gloria, Antonio, et al. "Alloys for aeronautic applications: state of the art and perspectives." *c 9.6* (2019): 662.
- [5] Jayakrishna, Kandasamy, et al. "Materials selection for aerospace components." *Sustainable composites for aerospace applications*. Woodhead Publishing, 2018. 1-18.
- [6] Bachmann, Jens, Carme Hidalgo, and Stéphanie Bricout. "Environmental analysis of innovative sustainable composites with potential use in aviation sector—A life cycle assessment review." *Science China Technological Sciences* 60.9 (2017): 1301-1317.
- [7] DebRoy, Tarasankar, et al. "Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties." *Progress in Materials Science* 92 (2018): 112-224.
- [8] Tofail, Syed AM, et al. "Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities." *Materials today* 21.1 (2018): 22-37.
- [9] Onuh, Spencer O., and Yahaya Y. Yusuf. "Rapid prototyping technology: applications and benefits for rapid product development." *Journal of intelligent manufacturing* 10.3 (1999): 301-311.
- [10] Ngo, Tuan D., et al. "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges." *Composites Part B: Engineering* 143 (2018): 172-196.
- [11] Guo, Nannan, and Ming C. Leu. "Additive manufacturing: technology, applications and research needs." *Frontiers of Mechanical Engineering* 8.3 (2013): 215-243.
- [12] Herzog, Dirk, et al. "Additive manufacturing of metals." *Acta Materialia* 117 (2016): 371-392.
- [13] Bhavar, Valmik, et al. "A review on powder bed fusion technology of metal additive manufacturing." *Additive manufacturing handbook* (2017): 251-253.
- [14] Cabanettes, Frédéric, et al. "Topography of as built surfaces generated in metal additive manufacturing: a multi scale analysis from form to roughness." *Precision Engineering* 52 (2018): 249-265.
- [15] Kumar, S. "10.05 Selective Laser Sintering/Melting In *Comprehensive Materials Processing*; Hashmi, S., Ed." (2014): 93-134.

- [16] Yap, Chor Yen, et al. "Review of selective laser melting: Materials and applications." *Applied physics reviews* 2.4 (2015): 041101.
- [17] Aboulkhair, Nesma T., et al. "3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting." *Progress in materials science* 106 (2019): 100578.
- [18] Mumtaz, Kamran, and Neil Hopkinson. "Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting." *Rapid Prototyping Journal* (2009).
- [19] Udriou, Razvan, Ion Cristian Braga, and Anisor Nedelcu. "Evaluating the quality surface performance of additive manufacturing systems: Methodology and a material jetting case study." *Materials* 12.6 (2019): 995.
- [20] Stimpson, Curtis K., et al. "Roughness effects on flow and heat transfer for additively manufactured channels." *Journal of Turbomachinery* 138.5 (2016).
- [21] Nagalingam, Arun Prasanth, and S. H. Yeo. "Surface finishing of additively manufactured Inconel 625 complex internal channels: A case study using a multi-jet hydrodynamic approach." *Additive Manufacturing* 36 (2020): 101428.
- [22] Bhushan, Bharat. "Surface roughness analysis and measurement techniques." *Modern tribology handbook* 1 (2001): 49-120.
- [23] Diaz, Agustin. "Surface texture characterization and optimization of metal additive manufacturing-produced components for aerospace applications." *Additive manufacturing for the aerospace industry*. Elsevier, 2019. 341-374.
- [24] Sahoo, P. "Surface topography." *Tribology for Engineers*. Woodhead Publishing, 2011. 1-32.
- [25] Leach, Richard, ed. *Optical measurement of surface topography*. Vol. 8. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [26] Leach, Richard K. "The measurement of surface texture using stylus instruments." (2014).
- [27] Townsend, Andrew, et al. "Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review." *Precision Engineering* 46 (2016): 34-47.
- [28] Caja García, Jesús, et al. "Some considerations about the use of contact and confocal microscopy methods in surface texture measurement." *Materials* 11.8 (2018): 1484.
- [29] Kubátová, Dana, Martin Melichar, and Jan Kutlwašer. "Software filters of surface roughness." *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika* (2017).
- [30] Butler D.L. (2014) Surface Roughness Measurement. In: Li D. (eds) *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-27758-0\\_1506-2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27758-0_1506-2).
- [31] Introduction to Surface Roughness Measurement. KEYENCE CORPORATION OF AMERICA ([www.keyence.com](http://www.keyence.com)).
- [32] Gadelmawla, E. S., et al. "Roughness parameters." *Journal of materials processing Technology* 123.1 (2002): 133-145.
- [33] Alfieri, Vittorio, et al. "Reduction of surface roughness by means of laser processing over additive manufacturing metal parts." *Materials* 10.1 (2017): 30.

- 
- [34] Bhaduri, Debajyoti, et al. "On the surface integrity of additive manufactured and post-processed AlSi10Mg parts." *Procedia CIRP* 87 (2020): 339-344.
- [35] Boschetto, Alberto, Luana Bottini, and Francesco Veniali. "Roughness modeling of AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting." *Journal of Materials Processing Technology* 241 (2017): 154-163.
- [36] Trevisan, Francesco, et al. "On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy: process, microstructure, and mechanical properties." *Materials* 10.1 (2017): 76.
- [37] Sercombe, Timothy B., and Xiaopeng Li. "Selective laser melting of aluminium and aluminium metal matrix composites." *Materials Technology* 31.2 (2016): 77-85.
- [38] Maamoun, Ahmed H., et al. "Effect of selective laser melting process parameters on the quality of al alloy parts: Powder characterization, density, surface roughness, and dimensional accuracy." *Materials* 11.12 (2018): 2343.
- [39] Wang, Lin-zhi, Sen Wang, and Jiao-jiao Wu. "Experimental investigation on densification behavior and surface roughness of AlSi10Mg powders produced by selective laser melting." *Optics & Laser Technology* 96 (2017): 88-96.
- [40] Wei, Pei, et al. "The AlSi10Mg samples produced by selective laser melting: single track, densification, microstructure and mechanical behavior." *Applied surface science* 408 (2017): 38-50.
- [41] Mohammadi, Mohsen, and Hamed Asgari. "Achieving low surface roughness AlSi10Mg\_200C parts using direct metal laser sintering." *Additive Manufacturing* 20 (2018): 23-32.
- [42] Wang, Di, et al. "Theoretical and experimental study on surface roughness of 316L stainless steel metal parts obtained through selective laser melting." *Rapid Prototyping Journal* (2016).
- [43] Tian, Yang, et al. "Influences of processing parameters on surface roughness of Hastelloy X produced by selective laser melting." *Additive Manufacturing* 13 (2017): 103-112.
- [44] Li, Bao-Qiang, et al. "Research on surface roughness of AlSi10Mg parts fabricated by laser powder bed fusion." *Metals* 8.7 (2018): 524.
- [45] Yang, Yongqiang, et al. "Accuracy and density optimization in directly fabricating customized orthodontic production by selective laser melting." *Rapid Prototyping Journal* (2012).
- [46] Kempen, Karolien, et al. "Processing AlSi10Mg by selective laser melting: parameter optimisation and material characterisation." *Materials Science and Technology* 31.8 (2015): 917-923.
- [47] Calignano, Flaviana, et al. "Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 67.9-12 (2013): 2743-2751.
- [48] Yasa, Evren, and Jean-Pierre Kruth. "Application of laser re-melting on selective laser melting parts." *Advances in Production engineering and Management* 6.4 (2011): 259-270.

- [49] Liu, Yang, et al. "Study on the influence of process parameters on the clearance feature in non-assembly mechanism manufactured by selective laser melting." *Journal of Manufacturing Processes* 27 (2017): 98-107.
- [50] Balbaa, M. A., et al. "Role of powder particle size on laser powder bed fusion processability of AlSi10Mg alloy." *Additive Manufacturing* 37 (2021): 101630.
- [51] Tan, Jun Hao, Wai Leong Eugene Wong, and Kenneth William Dalgarno. "An overview of powder granulometry on feedstock and part performance in the selective laser melting process." *Additive Manufacturing* 18 (2017): 228-255.
- [52] Spierings, Adriaan B., et al. "Powder flowability characterisation methodology for powder-bed-based metal additive manufacturing." *Progress in Additive Manufacturing* 1.1 (2016): 9-20.
- [53] Spierings, Adriaan B., Nikolaus Herres, and Gideon Levy. "Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts." *Rapid Prototyping Journal* (2011).
- [54] Sinico, Mirko, Ann Witvrouw, and Wim Dewulf. "Influence of the particle size distribution on surface quality of Maraging 300 parts produced by Laser Powder Bed Fusion." *Proceedings of the Special Interest Group meeting on Advancing Precision in Additive Manufacturing*. euspen, 2019.
- [55] Liu, Bochuan, et al. "Investigation the effect of particle size distribution on processing parameters optimisation in selective laser melting process." *Additive manufacturing research group, Loughborough University* (2011): 227-238.
- [56] Olakanmi, Eytayo Olatunde, R. F. Cochrane, and K. W. Dalgarno. "A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties." *Progress in Materials Science* 74 (2015): 401-477.
- [57] Kusoglu, Ihsan Murat, Bilal Gökce, and Stephan Barcikowski. "Research trends in laser powder bed fusion of Al alloys within the last decade." *Additive Manufacturing* (2020): 101489.
- [58] Charles, Amal, et al. "Effect of process parameters on the generated surface roughness of down-facing surfaces in selective laser melting." *Applied Sciences* 9.6 (2019): 1256.
- [59] Gheysen, Julie, et al. "Efficient optimization methodology for laser powder bed fusion parameters to manufacture dense and mechanically sound parts validated on AlSi12 alloy." *Materials & Design* (2020): 109433.
- [60] Koutiri, Imade, et al. "Influence of SLM process parameters on the surface finish, porosity rate and fatigue behavior of as-built Inconel 625 parts." *Journal of Materials Processing Technology* 255 (2018): 536-546.
- [61] Yang, Tao, et al. "The influence of process parameters on vertical surface roughness of the AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting." *Journal of Materials Processing Technology* 266 (2019): 26-36.
- [62] Poncelet, Olivier, et al. "Critical assessment of the impact of process parameters on vertical roughness and hardness of thin walls of AlSi10Mg processed by laser powder bed fusion." *Additive Manufacturing* 38 (2021): 101801.

- 
- [63] Manfredi, Diego, et al. "Additive manufacturing of Al alloys and aluminium matrix composites (AMCs)." *Light metal alloys applications* 11 (2014): 3-34.
- [64] Kamarudin, K., et al. "Dimensional accuracy and surface roughness analysis for AlSi10Mg produced by selective laser melting (SLM)." *MATEC Web of Conferences*. Vol. 78. EDP Sciences, 2016.
- [65] Leary, M. "Surface roughness optimisation for selective laser melting (SLM): accommodating relevant and irrelevant surfaces." *Laser additive manufacturing*. Woodhead Publishing, 2017. 99-118.
- [66] Galati, Manuela, et al. "Surface roughness prediction model for Electron Beam Melting (EBM) processing Ti6Al4V." *Precision Engineering* 69 (2021): 19-28.
- [67] Ga, Bastien, Nicolas Gardan, and Gauthier Wahu. "Methodology for part building orientation in additive manufacturing." *Comput-Aided Des Appl* 16.1 (2019): 113-128.
- [68] Di Angelo, Luca, Paolo Di Stefano, and Emanuele Guardiani. "Search for the Optimal Build Direction in Additive Manufacturing Technologies: A Review." *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 4.3 (2020): 71.
- [69] Koziar, Tomasz, and Jerzy Bochnia. "The influence of printing orientation on surface texture parameters in powder bed fusion technology with 316L steel." *Micromachines* 11.7 (2020): 639.
- [70] Li, Ruidi, et al. "Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 59.9 (2012): 1025-1035.
- [71] Ramos, J. A., D. L. Bourell, and J. J. Beaman. "Surface over-melt during laser polishing of indirect-SLS metal parts." *MRS Online Proceedings Library* 758.1 (2002): 191-199.
- [72] Kaji, Farzaneh, and Ahmad Barari. "Evaluation of the surface roughness of additive manufacturing parts based on the modelling of cusp geometry." *IFAC-PapersOnLine* 48.3 (2015): 658-663.
- [73] Lou, Shan, et al. "Characterisation methods for powder bed fusion processed surface topography." *Precision Engineering* 57 (2019): 1-15.
- [74] Newton, Lewis, et al. "Areal topography measurement of metal additive surfaces using focus variation microscopy." *Additive Manufacturing* 25 (2019): 365-389.
- [75] Triantaphyllou, Andrew, et al. "Surface texture measurement for additive manufacturing." *Surface Topography: Metrology and Properties* 3.2 (2015): 024002.
- [76] Stavropoulos, Panagiotis, and Panagis Foteinopoulos. "Modelling of additive manufacturing processes: a review and classification." *Manufacturing Review* 5 (2018): 2.
- [77] Ibrahim, Dzullijah, Songlin Ding, and Shoujin Sun. "Roughness prediction for FDM produced surfaces." *Proceedings of the International Conference Recent Trends in Engineering & Technology (ICRET'2014)*, Batam, Indonesia. 2014.
- [78] Loh, Loong-Ee, et al. "Numerical investigation and an effective modelling on the Selective Laser Melting (SLM) process with aluminium alloy 6061." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 80 (2015): 288-300.



- [79] Strano, Giovanni, et al. "Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting." *Journal of Materials Processing Technology* 213.4 (2013): 589-597.
- [80] Gharbi, Myriam, et al. "Influence of various process conditions on surface finishes induced by the direct metal deposition laser technique on a Ti-6Al-4V alloy." *Journal of materials processing technology* 213.5 (2013): 791-800.
- [81] Gu, Dongdong, and Yifu Shen. "Balling phenomena during direct laser sintering of multi-component Cu-based metal powder." *Journal of Alloys and Compounds* 432.1-2 (2007): 163-166.
- [82] Valente, E. H., Gundlach, C., Christiansen, T. L., & Somers, M. A. (2019). Effect of scanning strategy during selective laser melting on surface topography, porosity, and microstructure of additively manufactured Ti-6Al-4V. *Applied Sciences*, 9(24), 5554.
- [83] Kudzal, A., McWilliams, B., Hofmeister, C., Kellogg, F., Yu, J., Taggart-Scarff, J., & Liang, J. (2017). Effect of scan pattern on the microstructure and mechanical properties of powder bed fusion additive manufactured 17-4 stainless steel. *Materials & Design*, 133, 205-215.
- [84] Lu, Y., Wu, S., Gan, Y., Huang, T., Yang, C., Junjie, L., & Lin, J. (2015). Study on the microstructure, mechanical property and residual stress of SLM Inconel-718 alloy manufactured by differing island scanning strategy. *Optics & Laser Technology*, 75, 197-206.
- [85] Chang, S. J., & Wei, Z. X. (2020). Influences of the scanning strategy on surface roughness in selective laser melting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 0954405420978119.
- [86] Jiang, J., Chen, J., Ren, Z., Mao, Z., Ma, X., & Zhang, D. Z. (2020). The Influence of Process Parameters and Scanning Strategy on Lower Surface Quality of TA15 Parts Fabricated by Selective Laser Melting. *Metals*, 10(9), 1228.
- [87] Jia, H., Sun, H., Wang, H., Wu, Y., & Wang, H. (2021). Scanning strategy in selective laser melting (SLM): a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-23.
- [88] Hamrock, B. J., Schmid, S. R., & Jacobson, B. O. (2004). *Fundamentals of fluid film lubrication*. CRC press.
- [89] Vilardell, A. M., Krakhmalev, P., Fredriksson, G., Cabanettes, F., Sova, A., Valentin, D., & Bertrand, P. (2018). Influence of surface topography on fatigue behavior of Ti6Al4V alloy by laser powder bed fusion. *Procedia CIRP*, 74, 49-52.
- [90] Fabrication additive métallique – Les fondamentaux, CENTRE TECHNIQUE DES INDUSTRIES MÉCANIQUES (Cetim), 2019.
- [91] Bernard Raphet, «États de surface – Mesure» (2006).
- [92] Li, X. P., O'donnell, K. M., & Sercombe, T. B. (2016). Selective laser melting of Al-12Si alloy: Enhanced densification via powder drying. *Additive Manufacturing*, 10, 10-14.
- [93] Ali, H., Ghadbeigi, H., & Mumtaz, K. (2018). Processing parameter effects on residual stress and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(8), 4059-4068.

- 
- [94] Narasimharaju, S. R., Liu, W., Zeng, W., See, T. L., Scott, P., Jiang, X. J., & Lou, S. (2021). Surface texture characterization of metal selective laser melted part with varying surface inclinations. *Journal of Tribology*, 143(5).
- [95] Metelkova, J., Vanmunster, L., Haitjema, H., & Van Hooreweder, B. (2021). Texture of inclined up-facing surfaces in laser powder bed fusion of metals. *Additive Manufacturing*, 42, 101970.
- [96] Yan, X., Gao, S., Chang, C., Huang, J., Khanlari, K., Dong, D., ... & Liu, M. (2021). Effect of building directions on the surface roughness, microstructure, and tribological properties of selective laser melted Inconel 625. *Journal of Materials Processing Technology*, 288, 116878.
- [97] Triantaphyllou, A., Giusca, C. L., Macaulay, G. D., Roerig, F., Hoebel, M., Leach, R. K., ... & Milne, K. A. (2015). Surface texture measurement for additive manufacturing. *Surface topography: metrology and properties*, 3(2), 024002.
- [98] Matthews, M. J., Guss, G., Khairallah, S. A., Rubenchik, A. M., Depond, P. J., & King, W. E. (2017). Denudation of metal powder layers in laser powder-bed fusion processes. In *Additive Manufacturing Handbook* (pp. 677-692). CRC Press.



N° d'ordre: 2022LYSEE002

Prénom NOM: Elina MASIAGUTOVA

DISSERTATION TITLE: Study of the generation of lateral surface topographies from the LPBF process for an AlSi10Mg aluminum alloy

Specialty: Mechanics and engineering

Keywords: Laser powder bed fusion, Aluminum Alloy, Surface Topography, Process Parameters, Roughness optimization, Numerical Model

Abstract:

In the current study, surface generation during additive manufacturing (AM), especially the laser powder bed fusion (LPBF) process was studied. LPBF is a progressive process that can lead to new opportunities, such as applications that require complex structures (internal channels or lightweight lattice structures). It has therefore attracted considerable attention, which has led to research and development in many industries, particularly in the aerospace industry.

A surface generation study to optimize surface roughness and material density by examining the influence of the primary LPBF process parameters was therefore performed. During this study, the relationship between the roughness of the top and side surfaces and the density of the material was established. This made it possible to determine the first window of optimal parameters.

An analysis of the roughness dispersion and process reproducibility were then carried out. This analysis revealed a significant roughness dispersion, especially from one side to the other. As a result, recommendations on surface measurements have been proposed.

The effect of different process options (secondary parameters) are also studied in order to better understand the generation of the side surface and optimize it. This study showed that compensations and contour settings are key parameters that can help reduce the side surface roughness. Indeed, the geometric positioning of the different weld tracks is an important issue that must be addressed to reduce surface roughness. Based on the results of this study, it is possible to reduce the average surface roughness  $S_a$  from 40 to 10  $\mu\text{m}$ .

Finally, this thesis presents a new approach to modeling side surfaces roughness (at  $0^\circ$ ). The approach is based on the weld track geometry (radii of curvature). It allows to take into account the weld tracks and layers position in relation to each other and thus to predict the roughness for different scanning strategies, compensation parameters.

N° d'ordre : 2022LYSEE002

Prénom NOM : Elina MASIAGUTOVA

TITRE DE LA THÈSE, QUI D'AILLEURS : Étude de la génération des topographies de surfaces latérales issues du procédé LPBF pour un alliage d'aluminium AlSi10Mg

Spécialité: Mécanique et ingénierie

Mots clefs : Fusion laser sur lit de poudre, Alliage d'aluminium, Topographie de surface, Paramètres de procédé, Optimisation de la rugosité, Modèle numérique

Résumé :

Dans le cadre de ce travail, la génération des surfaces produites par le procédé de fusion laser sur lit de poudre LPBF a été étudiée. Le LPBF est un procédé de fabrication additive qui peut conduire à de nouvelles opportunités (fabrication de structures complexes avec canaux internes, structures lattices). Ce procédé attire donc une attention considérable en particulier dans l'industrie aéronautique.

Une étude de l'influence des paramètres primaires du procédé LPBF sur la génération des surfaces a été réalisée. Au cours de cette étude, la relation entre la rugosité des surfaces supérieures et latérales et la densité du matériau a été établie. Cela a permis de déterminer la première fenêtre de paramètres optimaux.

Une analyse de la dispersion de la rugosité et la reproductibilité du procédé ont ensuite été réalisées. Cette analyse a révélé une importante dispersion de la rugosité, notamment d'une face à l'autre. En conséquence, des recommandations sur les mesures de surface ont été proposées.

L'effet de différents paramètres secondaires est également étudié afin de mieux comprendre la génération de la surface latérale et de l'optimiser. Cette étude a montré que les compensations et les réglages de contour sont des paramètres clés qui peuvent contribuer à la réduction de la rugosité des surfaces latérales.

Sur la base des résultats de ces études, la rugosité a pu être diminuée d'un Sa de 40  $\mu\text{m}$  à un Sa de 10  $\mu\text{m}$ .

Enfin, cette thèse présente une nouvelle approche de modélisation de génération des topographies des surfaces latérales. L'approche est basée sur la géométrie du cordon (rayons de courbure). Elle permet de prendre en compte la position des cordons et des couches et prédit la rugosité pour différentes stratégies de lasage et paramètres de compensation.