



HAL
open science

Modélisation du polissage laser de pièces obtenues suivant les procédés primaires d'usinage et de fabrication directe.

Benoit Rosa

► **To cite this version:**

Benoit Rosa. Modélisation du polissage laser de pièces obtenues suivant les procédés primaires d'usinage et de fabrication directe.. Génie mécanique [physics.class-ph]. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2015. Français. NNT: . tel-01204529v2

HAL Id: tel-01204529

<https://hal.science/tel-01204529v2>

Submitted on 13 Oct 2015

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.

Thèse de Doctorat

Benoit ROSA

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du
grade de Docteur de l'Ecole Centrale de Nantes
sous le label de L'Université Nantes Angers Le Mans*

École doctorale : Sciences pour l'ingénieur, géosciences, architecture

Discipline : Génie Mécanique, productique transport

Unité de recherche : *Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes*

Soutenue le 9 Juillet 2015

Modélisation du polissage laser de pièces obtenues suivant les procédés primaires d'usinage et de fabrication directe

JURY

Présidente :	Claire LARTIGUE , Professeure, IUT de Cachan
Rapporteurs :	Patrice PEYRE , Directeur de Recherche CNRS, Arts et Métiers ParisTech, Paris Walter RUBIO , Professeur, Université de Toulouse III
Examineurs :	Eric BOILLAT , Professeur Assistant, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse
Invité(s) :	Roberto PEREZ , Responsable de Recherche Appliquée, AgieCharmilles, Meyrin, Suisse
Directeur de Thèse :	Jean-Yves HASCOET , Professeur, Ecole Centrale de Nantes
Co-directeur de Thèse :	Pascal MOGNOL , Professeur, Ecole Normale Supérieure de Rennes

Résumé

En vue d'atteindre la qualité fonctionnelle dictée par le cahier des charges, une pièce mécanique nécessite la réalisation de plusieurs opérations. Ainsi, la chaîne manufacturière est composée de différents procédés de fabrication. Les procédés primaires permettent l'obtention de surfaces, qui pour des fonctions esthétiques ou tribologiques nécessitent la réalisation d'opérations de parachèvement. Les procédés de polissage conventionnels disposent d'inconvénients qualitatifs, productifs, environnementaux ou sanitaires, et en vue de pallier ces différentes problématiques tout en améliorant la qualité des surfaces, le procédé de polissage laser est investigué.

Ces travaux de thèse s'intègrent dans un contexte global de fabrication par l'investigation du procédé de polissage laser en fonction de deux procédés primaires : l'usinage et la fabrication directe.

Dans une optique de maîtrise, et à partir d'investigations expérimentales et de modèles comportementaux, ces travaux permettent de proposer un protocole ainsi qu'une méthodologie de détermination des paramètres opératoires. Efficaces au sein des domaines de faisabilité et optimal, les outils proposés prennent en considération différentes fonctions objectif qualitatives. Aussi, compte tenu des avantages de la fabrication directe, ces travaux de thèse investiguent le polissage laser de pièces de formes complexes et de sections minces.

Les paramètres optimaux déterminés permettent d'obtenir une réduction de rugosité surfacique de 99%. Enfin, la méthodologie d'investigation souligne l'importance de la topologie de la pièce lors du choix des paramètres opératoires.

Mots clés

Polissage laser, fabrication directe, usinage, expérimentations, modélisation, optimisation, méthodologie, topographies initiale et finale.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes encadrants de thèse Jean-Yves Hascoët et Pascal Mognol de m'avoir donné l'opportunité de réaliser cette thèse. Je tiens particulièrement à les remercier pour leurs compétences professionnelles et scientifiques mais aussi pour leurs qualités personnelles et humaines. Merci de m'avoir transmis vos connaissances, soutenu, fait confiance, et donné les outils nécessaires à mon évolution à la fois professionnelle, personnelle et intellectuelle. Merci pour tout, vraiment.

Je tiens également à remercier les membres du jury d'avoir participé à cette soutenance et je les remercie pour les remarques constructives qu'ils ont apportées à ces travaux.

Merci à Gilles Carabin pour ces longues discussions enrichissantes et pour ses grandes compétences techniques, expérimentales et scientifiques. C'était vraiment agréable de venir travailler à l'IRCCyN. Merci à vous, Gilles et Thierry Broquin, pour votre accueil et votre bonne humeur, vous formez un bon binôme.

Je tiens à remercier le Professeur François GOUIN, du CHU de Nantes, de m'avoir accueilli dans son service lors de ma formation doctorale. Ce fut une expérience inoubliable.

D'un point de vue projet, je tiens à remercier Laurent Dubourg pour son appui technique, et toute l'équipe de Maupertuis. Merci au CRT Morlaix, notamment à Jean-Baptiste Charrier et Gaël Bourbouze, pour leur implication et leurs apports techniques dans le projet.

Merci à mes amis de l'équipe de Bretagne UGV : Carole, Sébastien, Patrick, Pierre et Gilles, pour cette ambiance de travail agréable et très enrichissante. Merci pour vos compétences professionnelles et personnelles, et merci de votre soutien durant ces travaux de thèse. J'ai passé de très bons moments avec vous, trois ans ça passe vraiment vite...

Merci à Olivier Kerbrat, pour les pauses cigarettes intellectuelles, pour les discussions scientifiques, pédagogiques et industrielles.

Merci aux anciens thésards devenus Docteurs : Pierre, Rémi et Florent, pour leur sympathie et toutes ces discussions.

Merci à mes amis d'enfance Fabien, Remy et Jean-Philippe ainsi qu'à mon ancien tuteur de stage et ami Tony. Merci Tony pour ta curiosité envers la mécanique, Jean-Philippe pour ton franc-parler, Rémy pour avoir animé toutes ces soirées, et Fabien pour m'avoir suivi durant toutes ces années d'études. Je remercie également mon cousin Eric pour son soutien, et pour les discussions philosophiques qui m'ont beaucoup aidé dans ma réflexion professionnelle et personnelle.

Bien évidemment, je remercie mes parents, qui ont persévéré et m'ont poussé à faire des études malgré un début difficile. Merci de m'avoir soutenu et conseillé dans mes choix. Merci à vous deux de m'avoir poussé à être « docteur de la petite pièce » comme dit maman. Je remercie ma sœur pour sa joie de vivre, son enthousiasme, son dynamisme et pour tous ces moments de rigolade qui m'ont aidé à relativiser. Et bienvenue à ma nièce, Camille.

Enfin, je remercie ma compagne Gaëlle, de m'avoir soutenu durant les moments difficiles de cette thèse, de m'avoir bien conseillé et écouté. Merci d'avoir écouté toutes mes présentations, je pense que maintenant tu en sais beaucoup sur le polissage laser et la conception mécanique. Je te remercie de tout mon cœur pour ton soutien, ta patience et ton optimisme.

Table des matières

Remerciements	v
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xiv
Chapitre 1 : contexte général de l'étude.....	1
1.1 Contexte du projet de recherche	2
1.2 Introduction	2
1.3 Contexte de l'étude	3
1.4 Techniques conventionnelles de parachèvement.....	3
1.5 Principe du polissage laser et applications	4
1.6 Principe général de la fabrication additive et applications	6
1.7 Conclusion	8
Chapitre 2 : état de l'art et positionnement des travaux	9
2.1 Introduction	10
2.2 Approche expérimentale.....	10
2.2.1 Macro-polissage de lignes.....	10
2.2.2 Macro-polissage de surfaces	13
2.2.2.1 Conclusion	16
2.2.3 Micro-polissage.....	17
2.2.3.1 Conclusion	19
2.2.4 Stratégie dual-Beam.....	19
2.2.5 Conclusion générale sur l'approche expérimentale	20
2.3 Modélisation et simulation	20
2.3.1 Modélisation expérimentale.....	20
2.3.1.1 Conclusion	22
2.3.2 Modélisation analytique.....	22
2.3.3 Modélisation géométrique.....	22
2.3.4 Modélisation et simulation multi-physique	23
2.3.4.1 Conclusion	25
2.3.5 Génération de trajectoires	25
2.3.6 Conclusion générale sur la modélisation et la simulation.....	26
2.4 Analyse du matériau après polissage laser	27
2.5 Optimisation suivant une approche multi-process.....	28
2.5.1 Conclusion	29
2.6 Polissage laser de pièces obtenues par fabrication directe	30

2.6.1	Conclusion	33
2.7	Polissage laser de formes complexes.....	33
2.8	Synthèse de l'état de l'art et verrous scientifiques	34
2.9	Positionnement des travaux de recherche.....	35
Chapitre 3	: polissage laser de pièces usinées	39
3.1	Introduction	40
3.2	Contexte et verrous scientifiques.....	40
3.3	Méthodologie d'investigation.....	41
3.4	Etude de faisabilité	42
3.4.1	Expérimentations	42
3.4.2	Matériel	42
3.4.3	Résultats et analyses	43
3.4.4	Conclusion	46
3.5	Etude avancée	46
3.5.1	Expérimentations	46
3.5.2	Matériel	48
3.5.3	Incertitudes de mesures et variabilité du procédé	48
3.5.4	Résultats et analyses	49
3.5.4.1	Incertitudes de mesures et variabilité du procédé.....	49
3.5.4.2	Expérimentations	49
3.5.5	Conclusion	52
3.6	Modélisation	52
3.6.1	Apprentissage du modèle	52
3.6.2	Généralisation du modèle.....	54
3.6.3	Validation expérimentale	55
3.6.4	Conclusion	56
3.7	Optimisation	56
3.7.1	Optimisation du taux de recouvrement de passe.....	56
3.7.2	Optimisation des temps de cycles	60
3.7.3	Optimisation multi-procédés.....	60
3.7.4	Etude technico-économique.....	61
3.7.5	Conclusion	62
3.8	Protocole de détermination des paramètres multi-procédés	62
3.9	Conclusion générale	65
Chapitre 4	: polissage laser de pièces obtenues par fabrication directe.....	66
4.1	Introduction	67

4.2	Contexte et verrous scientifiques.....	67
4.3	Méthodologie d’investigation.....	68
4.4	Polissage laser de surfaces planes	68
4.4.1	Etude de faisabilité.....	69
4.4.1.1	Analyse de la topographie initiale	69
4.4.1.2	Problématiques après polissage laser	71
4.4.1.3	Analyse métallographique après polissage laser	72
4.4.2	Modélisation et optimisation.....	73
4.4.2.1	Optimisation de l’environnement gazeux.....	73
4.4.2.2	Modélisation et optimisation de l’avance	74
4.4.2.3	Modélisation et optimisation de l’Overlap	75
4.4.2.4	Modélisation et optimisation du nombre de passes	77
4.4.2.5	Modélisation et optimisation de l’Offset	80
4.4.2.6	Impact de la densité d’énergie	83
4.4.3	Applications	84
4.4.3.1	Polissage laser du TA6V	84
4.4.3.2	Polissage laser de pièce de forme complexe	85
4.4.4	Conclusion	86
4.5	Polissage laser de surfaces cylindriques	87
4.5.1	Modélisation et optimisation.....	88
4.5.1.1	Impact de la cellule de confinement	88
4.5.1.2	Modélisation et optimisation de l’avance	90
4.5.1.3	Modélisation et optimisation de la puissance	91
4.5.1.4	Modélisation et optimisation de l’Overlap	92
4.5.1.5	Modélisation et optimisation du nombre de passes	93
4.5.1.6	Impact du rayon de courbure	94
4.5.1.7	Analyse de la déformation géométrique	96
4.5.2	Conclusion	97
4.6	Conclusion générale	98
Chapitre 5 : méthodologie de détermination des paramètres opératoires.....		102
5.1	Introduction	103
5.2	Concept général	103
5.3	Hierarchisation des modèles	104
5.4	Principe de détermination des comportements intermédiaires	105
5.4.1	Principe d’interpolation	106

5.4.2	Application du principe d'interpolation.....	108
5.5	Conclusion.....	110
Chapitre 6 : conclusion et perspectives		111
6.1	Conclusion.....	112
6.2	Perspectives.....	113
Bibliographie.....		116

Liste des figures

Figure 1.1:	exemples de procédés de parachèvement	3
Figure 1.2:	principe du procédé électrochimique.....	4
Figure 1.3:	variantes du procédé de polissage laser.....	5
Figure 1.4:	principe du procédé de polissage par laser.....	5
Figure 1.5:	exemples de pièces polies par laser pièces d'un système d'assistance cardiaque a), et Moule b).....	6
Figure 1.6:	exemples de matériaux travaillés en fabrication additive.....	7
Figure 1.7:	exemples de pièces métalliques obtenues par fabrication directe.....	7
Figure 1.8:	principe de la technologie de fabrication additive par lit de poudres.....	8
Figure 1.9:	principe de la technologie de fabrication additive par projection de poudres métalliques.....	8
Figure 2.1:	principe du régime SOM.....	11
Figure 2.2:	topographie initiale (gauche) et ligne polie par laser optimisée (droite) ($P = 750W$; $V_f = 1920 \text{ mm/min}$, $O_f = 20 \text{ mm}$).....	12
Figure 2.3:	cas d'une topographie non optimale.....	12
Figure 2.4:	topographie finale pour une puissance trop élevée (950 W).....	12
Figure 2.5:	paramètres opératoires optimaux déterminés suivant le matériau.....	13
Figure 2.6:	principe du taux de recouvrement de passe.....	13
Figure 2.7:	impact du taux de recouvrement sur le pourcentage de réduction de rugosité.....	14
Figure 2.8:	comparaison visuelle des topographies avant et après polissage laser suivant un Overlap de 95%.....	14
Figure 2.9:	fonction transfert pour l'Overlap de 95%.....	14
Figure 2.10:	optimisation d'une surface polie suivant une stratégie multi-passes effectuée selon un laser continu et pulsé.....	15
Figure 2.11:	topographie initiale tournée (gauche) et topographie finale polie par laser (droite) selon les paramètres optimaux déterminés expérimentalement.....	15
Figure 2.12:	topographie initiale fraisée (gauche) et topographie finale polie par laser (droite) selon les paramètres optimaux déterminés expérimentalement.....	15
Figure 2.13:	évolution de la rugosité finale selon les paramètres opératoires.....	16
Figure 2.14:	pièce micro-fabriquée.....	17
Figure 2.15:	échantillon micro-fabriquée poli par laser.....	17
Figure 2.16:	topographie polies non optimales.....	18
Figure 2.17:	impact de la stratégie multi-passes sur la réduction de rugosité.....	18
Figure 2.18:	méthodologie et étapes du processus de traitement laser sélectif.....	19
Figure 2.19:	surface texturée par laser.....	19
Figure 2.20:	principe de la stratégie dual-beam.....	20

Figure 2.21: détermination des paramètres optimaux selon la méthode des surfaces de réponses	20
Figure 2.22: surfaces de réponses suivant le laser utilisé.....	21
Figure 2.23: efficacité du type de laser sur le pourcentage de réduction de rugosité	21
Figure 2.24: validation expérimentale du modèle de prédiction statistique.....	22
Figure 2.25: système entrée / sortie du procédé de micro-polissage laser	22
Figure 2.26: principe d'une aspérité irradiée par laser	23
Figure 2.27: modèles géométriques des aspérités de surface.....	23
Figure 2.28: topographie initiale (a), mesurée (b), prédite (c)	24
Figure 2.29: ligne mesurée (gauche) polie par laser et ligne simulée (droite)	25
Figure 2.30: stratégie zig zag et topographie induite par ce type de stratégie	26
Figure 2.31: simulation de trajectoires adaptées selon des temps de processus différents	26
Figure 2.32: microfissures après polissage laser	27
Figure 2.33: surface polie sans protection (gauche) et avec argon (droite)	27
Figure 2.34: caractérisation d'une surface usinée obtenue suivant une fraise hémisphérique dans le cas d'usinage de formes complexes	28
Figure 2.35: topographies avant (a) et après polissage laser (b)	29
Figure 2.36: modélisation du procédé de polissage laser par la méthode des surfaces de réponses	29
Figure 2.37: topographie initiale obtenue par SLS (gauche) et polie par laser (droite)	30
Figure 2.38: topographie initiale obtenue par fabrication directe (SLS) (gauche) et topographie polie par laser (droite) selon un taux de recouvrement de 25%	30
Figure 2.39: évolution du paramètre R_t suivant les paramètres de polissage laser.....	31
Figure 2.40: rugosités finales en fonction de l'angle (α) de fabrication de la topographie initiale.....	31
Figure 2.41: surface de réponse (a) entre la puissance laser, l'avance et la rugosité finale pour un offset égal à 0 et validation expérimentale du modèle (b)	32
Figure 2.42: modélisation analytique de la topographie avant (a) et après polissage laser (b)	32
Figure 2.43: principe de détermination du paramètre R_a	32
Figure 2.44: validation expérimentale du modèle analytique	33
Figure 2.45: surface initiale (gauche) est surface polie par laser (droite)	33
Figure 2.46: pale de turbine polie par laser	34
Figure 2.47: positionnement des travaux de recherche dans un contexte global de fabrication	36
Figure 2.48: positionnement des travaux de recherche selon les verrous scientifiques, dans le cas du polissage laser de pièces usinées	37
Figure 2.49: positionnement des travaux de recherches selon les verrous scientifiques, dans le cas du polissage laser de pièces obtenues par fabrication directe	38
Figure 3.1: méthodologie d'investigation	41
Tableau 3.1: paramètres opératoires étudiés et valeurs expérimentales associées.....	42
Figure 3.2: matériel utilisé lors des essais de polissage laser.....	42
Figure 2.3: principe du microscope à variation focale	43
Figure 3.4: topographies initiale (a), et polies par laser suivant des puissances de 600 W (b) et 1300 W (c) pour une hauteur de crête initiale de 150 μm	44
Figure 3.5: topographies polies par laser suivant des puissances de 950 W (a) et 600 W (b) pour une hauteur de crête de 50 μm	44
Figure 3.6: topographie polie par laser suivant une puissance de 750 W pour une hauteur de crête de 60 μm et profils associés.....	45
Figure 3.7: profils de topographies polies au centre et au bord du passage du faisceau.....	45
Figure 3.8: principe du taux de recouvrement de passe	46

Figure 3.9: topologie des échantillons.....	48
Figure 3.10: sélection d'une zone d'étude sur la surface à analyser	49
Tableau 3.3: incertitude sur la répétabilité de mesure.....	49
Tableau 3.4: incertitude sur l'aire de mesure	49
Tableau 3.5: incertitude sur la variabilité du procédé de polissage laser	49
Figure 3.11: topographie finale polie par laser suivant les paramètres optimaux déterminés .	50
Figure 3.12: profils de rugosité avant et après polissage laser (Axe Y) suivant les paramètres optimaux déterminés par la matrice expérimentale.....	51
Figure 3.13: profil de rugosité après polissage laser (Axe X) suivant les paramètres optimaux déterminés par la matrice expérimentale.....	51
Figure 3.14: graphe des effets de la matrice L16	51
Figure 3.15: effets de h_c et P sur S_a	52
Figure 3.16: corrélation entre les valeurs mesurées et prédites du pourcentage de réduction de S_a par le modèle statistique.....	53
Figure 3.17: corrélation entre les valeurs mesurées et prédites du S_a par le modèle statistique	54
Figure 3.18: capacité prédictive du modèle quadratique selon la méthode de validation croisée	55
Figure 3.19: valeurs mesurées et prédites du pourcentage de réduction de S_a	56
Figure 3.20: valeurs mesurées et prédites de la rugosité surfacique	56
Figure 3.21: surfaces de réponses des données expérimentales	57
Figure 3.22: modélisation du comportement du taux de recouvrement de passe	58
Figure 3.23: topographie optimisée suivant un taux de recouvrement de passe de 90 %	58
Figure 3.24: courbe de productivité du taux de recouvrement de passe	59
Figure 3.25: profil de rugosité perpendiculaire à h_c pour un Overlap de 40 %.....	59
Figure 3.26: profil de rugosité perpendiculaire à h_c pour un Overlap de 60 %.....	59
Figure 3.27: profil de rugosité perpendiculaire à h_c pour un Overlap de 80 %.....	60
Figure 3.28: surface initiale d'un h_c de 300 μm polie suivant une stratégie multi-passes	61
Figure 3.29: protocole de détermination des paramètres multi-procédés	64
Figure 4.1: machine hybride utilisée lors des expérimentations de polissage et de fabrication additive	68
Figure 4.2: stratégie de fabrication primaire utilisée lors de l'étude de faisabilité	69
Figure 4.3: topographie et profil de surface obtenue par projection de poudres.....	70
Figure 4.4: topographies d'une surface complexe suivant la direction de fabrication.....	70
Figure 4.5: topographies polie et initiale et défauts après polissage	71
Figure 4.6: Microscope à Balayage Electronique (MEB)	72
Figure 4.7: composition du défaut de matériau après polissage laser	72
Figure 4.8: cellule de confinement réalisée pour les expérimentations	73
Figure 4.9: oxydation de la surface suivant la stratégie de fabrication	73
Figure 4.10: impact de la cellule de confinement sur l'intégrité avant et après polissage laser	74
Figure 4.11: impact de l'avance sur le S_a calculé suivant une analyse multi-échelles.....	75
Figure 4.12: fissuration en fonction de l'avance	75
Figure 4.13: modélisation multi-échelles du comportement de l'Overlap.....	76
Figure 4.14: microfissures engendrées par des taux de recouvrement de 70 ; 80 et 90%.....	76
Figure 4.15: comportement du taux de recouvrement selon des paramètres opératoires et une topographie initiale différents	77
Figure 4.16: profil de rugosité avant et après polissage suivant une stratégie de 5 passes	77
Figure 4.17: modélisation multi-échelles du comportement du nombre de passes.....	78
Figure 4.18: texture peau d'orange engendrée par le polissage laser.....	78

Figure 4.19: évolution de la topographie en fonction du nombre de passes	78
Figure 4.20: évolution du paramètre W_{sm} suivant l'augmentation du nombre de passes	79
Figure 4.21: amélioration de l'intégrité de surface suivant une stratégie multi-passes	79
Figure 4.22: structure étagée après une stratégie multi-passes	80
Figure 4.23: variation de l'Offset vis-à-vis de l'accessibilité de la surface	80
Figure 4.24: répartition de la densité d'énergie selon l'Offset.....	80
Figure 4.25: évolution de la texture de la surface en fonction de l'augmentation de l'Offset .	81
Figure 4.26: impact de l'offset sur le S_a suivant une analyse multi-échelles	81
Figure 4.27: modélisation multi-échelles de l'Offset pour des valeurs situées entre 5 et 20 mm	82
Figure 4.28: modélisation multi-échelles de l'Offset pour des valeurs situées entre 20 et 40 mm.....	82
Figure 4.29: impact de l'Offset sur la protection gazeuse.....	82
Figure 4.30: impact des combinaisons de P et V_f sur le S_a	84
Figure 4.31: topographies initiales et polies par laser dans le cas du TA6V	85
Figure 4.32: stratégie de polissage utilisée pour le traitement d'une surface complexe	85
Figure 4.33: surface de forme complexe et de section mince polie par laser.....	86
Figure 4.34: hiérarchisation de l'Overlap et du nombre de passes sur l'optimisation	87
Figure 4.35: topologie des échantillons utilisés pour la campagne exploratoire	88
Figure 4.36: montage utilisé pour l'opération de polissage suivant une stratégie 5 axes normale à la surface.....	88
Figure 4.37: impact de l'environnement sur le S_a en fonction de l'avance.....	89
Figure 4.38: fissurations suivant l'avance sans cellule de confinement.....	90
Figure 4.39: modélisation multi-échelles de l'avance dans le cas d'un environnement gazeux non maîtrisé	90
Figure 4.40: impact multi-échelles suivant l'augmentation de l'avance (diminution de l'efficacité et augmentation de l'oxyde de silice)	91
Figure 4.41: impact de la puissance sur le S_a selon une analyse multi-échelles appliquée à une courbure de rayon 30 mm.....	91
Figure 4.42: modélisation multi-échelles du comportement de la puissance.....	92
Figure 4.43: modélisation multi-échelles du taux de recouvrement appliqué à un rayon de courbure de 30 mm pour une puissance de 155 W	92
Figure 4.44: évolution du comportement de l'Overlap selon la puissance	93
Figure 4.45: modélisation multi-échelles du comportement du nombre de passes pour une puissance de 105 W et un Overlap de 40%	93
Figure 4.46: évolution du comportement du nombre de passes en fonction de l'Overlap.....	94
Figure 4.47: évolution du lissage en fonction de l'augmentation du taux de recouvrement selon une stratégie de 4 passes	94
Figure 4.48: impact de la puissance sur le S_a en fonction du rayon de courbure	95
Figure 4.49: évolution de la topographie en fonction de la courbure de la pièce pour une puissance de 205 W	95
Figure 4.50: impact de la courbure sur l'efficacité du polissage laser	96
Figure 4.51: méthode de quantification de la déformation géométrique engendrée par le polissage laser	96
Figure 4.52: comportement de déformation en fonction de la puissance et de la courbure de la pièce	97
Figure 4.53: comportement de la déformation en fonction de l'Overlap pour une puissance de 105 W et un rayon de courbure de 30 mm	97
Figure 4.54: domaine de faisabilité de l'avance et du taux de recouvrement en fonction de la fissuration	99

Figure 4.55: domaine de faisabilité de l'Offset et du nombre de passes en fonction de l'oxydation	99
Figure 4.56: schématisation du principe d'optimisation hiérarchique	100
Figure 5.1: vision globale du système	103
Figure 5.2: composition de la méthodologie	104
Figure 5.3: hiérarchisation des paramètres opératoires vis-à-vis de l'optimisation progressive de la rugosité surfacique.....	105
Figure 5.4: principe de détermination du comportement intermédiaire	105
Figure 5.5: principe d'interpolation.....	106
Figure 5.6: principe d'interpolation de modèles comportementaux	106
Figure 5.7: principe d'interpolation appliqué au taux de recouvrement de passe pour une puissance intermédiaire	107
Figure 5.8: principe d'interpolation appliqué au nombre de passes pour un Overlap intermédiaire et une puissance testée expérimentalement.....	107
Figure 5.9: principe d'interpolation appliqué au nombre de passes pour une puissance intermédiaire.....	108
Figure 5.10: application du principe d'interpolation pour des puissances intermédiaires de 130 et 180 W dans le cas de l'optimisation de l'Overlap.....	109
Figure 5.11: application du principe d'interpolation pour des Overlap de 30 et 50 % dans le cas de l'optimisation du nombre de passes (P= 105W)	109

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : valeurs mesurées et prédites par le modèle de simulation.....	24
Tableau 2.2 : résultats des expérimentations et réglages des paramètres d'entrée.....	28
Tableau 3.1 : paramètres opératoires étudiés et valeurs expérimentales associées.....	42
Tableau 3.2 : matrice expérimentale de type Taguchi et valeurs des paramètres opératoires.....	47
Tableau 3.3 : incertitude sur la répétabilité de mesure.....	49
Tableau 3.4 : incertitude sur l'aire de mesure.....	49
Tableau 3.5 : incertitude sur la variabilité du procédé de polissage laser.....	49
Tableau 3.6 : matrice expérimentale L ₁₆ et résultats des essais.....	50
Tableau 3.7 : paramètres testés pour la validation expérimentale du modèle statistique.....	55
Tableau 3.8 : impact de la stratégie sur la rugosité surfacique.....	60
Tableau 3.9 : comparaisons des temps de productivité de l'usinage et du polissage laser pour une qualité finale identique.....	62
Tableau 4.1 : composition de la poudre de 316L utilisée lors de la fabrication directe.....	72
Tableau 4.2 : valeurs opératoires de la puissance et de l'avance pour une même densité d'énergie.....	83

Chapitre 1 : contexte général de l'étude

1.1	Contexte du projet de recherche	2
1.2	Introduction	2
1.3	Contexte de l'étude	3
1.4	Techniques conventionnelles de parachèvement.....	3
1.5	Principe du polissage laser et applications	4
1.6	Principe général de la fabrication additive et applications	6
1.7	Conclusion	8

1.1 Contexte du projet de recherche

Ces travaux de recherche s'inscrivent dans un projet industriel basé sur un financement Européen de type FEDER (Fonds européen de développement régional) et fait intervenir plusieurs partenaires, dont l'Ecole Normale Supérieure de Rennes, l'Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes, l'institut Maupertuis et le CRT de Morlaix.

1.2 Introduction

De par un contexte économique de plus en plus exigeant et compétitif, l'industrie mécanique doit sans cesse optimiser ses coûts de production ainsi que la qualité des produits. Afin d'optimiser ces coûts, diverses technologies de fabrication mécaniques sont à disposition des industriels. Ces procédés de fabrication complexes, nécessitent une maîtrise parfaite en vue d'atteindre un objectif optimal selon une qualité donnée et en un minimum de temps. La chaîne d'élaboration d'un produit se compose de divers procédés de fabrication ayant chacun un objectif bien déterminé. Ainsi, il est indispensable que la maîtrise de la fabrication se concentre sur la chaîne globale [Rauch2012] et non sur un seul procédé afin de garantir une optimisation cohérente avec les attentes technico-économiques.

Pour des fonctions esthétiques ou tribologiques par exemple, les surfaces des pièces obtenues selon un procédé de fabrication dit primaire, nécessitent une opération de finition telle que le polissage. L'opération de finition est une étape décisive pour la qualité de la pièce finale, mais aussi sur la chaîne de fabrication. L'opération de polissage intervient après plusieurs étapes de fabrication, ce qui fait de cette opération la dernière étape du processus. Cette position en bout de chaîne de fabrication constitue un risque économique dès lors que la pièce est rebutée au cours de cette dernière étape.

Le polissage est une opération encore souvent réalisée manuellement et son automatisation se démocratise de plus en plus. L'opération de polissage manuel est longue et coûteuse, et nécessite une formation conséquente des opérateurs. De plus, de par un processus manuel, les efforts appliqués à la surface sont mal maîtrisés, ce qui peut conduire à un taux de rebut élevé. Enfin, il est important de noter certains problèmes sanitaires sur les opérateurs comme l'inhalation de poussières métalliques ou encore les risques musculo-squelettiques causés par la répétition de la tâche.

L'opération de polissage automatisée peut être réalisée à l'aide d'un outil abrasif, positionné sur différents porteurs, qui peuvent être un robot anthropomorphe ou une machine-outil. Ce type de technologie demeure performant en termes de temps de cycles, cependant l'accessibilité des surfaces complexes de faible courbure est limitée à cause du diamètre de l'outil. D'autres technologies existent, comme le polissage électrochimique. Cependant, compte tenu de l'utilisation de bains chimiques, cette technologie a un impact négatif sur l'environnement.

Dans une optique d'automatisation du procédé de polissage et afin de garantir une accessibilité ainsi qu'une maîtrise des surfaces complexes, le polissage par laser est une solution technologique à investiguer.

1.3 Contexte de l'étude

Conformément à un contexte global de fabrication de pièce fonctionnelle, la présente étude positionne le procédé de polissage au sein de la chaîne de fabrication. Dans cette optique, ces travaux de recherche intègrent deux types de procédés primaires : par enlèvement et par ajout de matière, soit respectivement le procédé d'usinage à grande vitesse (UGV) et le procédé de fabrication directe par projection de poudres et fusion laser (Direct Metal Deposition). Les deux procédés primaires étudiés nécessitent des opérations de polissage en vue d'améliorer l'état de surface mais aussi afin de garantir une certaine productivité. De plus, grâce à l'utilisation du laser, il est possible de réaliser les opérations de fabrication additive et de polissage laser sur un seul porteur. Cette configuration permet d'optimiser la productivité et de diminuer les dispersions liées au repositionnement, mais aussi d'améliorer l'accessibilité. En effet, il est possible d'alterner les procédés entre chaque couche de matière déposée, ce qui permet de polir les surfaces difficiles d'accès, comme les surfaces intérieures.

1.4 Techniques conventionnelles de parachèvement

Dans le cas du fraisage, la rugosité arithmétique (R_a) minimale atteignable est de $0,8 \mu\text{m}$ pour le fraisage et $0,4 \mu\text{m}$ pour le cas du tournage [Guiot2012]. Pour des rugosités inférieures, les temps de process deviennent prohibitifs industriellement parlant. Or, dans le cas d'une fabrication de prothèse par exemple, la norme BS EN ISO 21534 [Norme BS EN ISO 21534], préconise une rugosité inférieure située entre $0,05$ et $0,5 \mu\text{m}$. Ainsi, la surface usinée nécessite obligatoirement l'intervention d'une opération de parachèvement. Divers procédés de parachèvement (Figure 1.1) sont à disposition des industriels et leur choix s'effectue en fonction de la capacité qualitative du procédé, du matériau, du temps de traitement et de la forme de la surface à traiter. Cependant certains procédés comme la rectification, le rodage, le toilage et le polissage conventionnel (polisseuse) permettent seulement de traiter des surfaces simples de type planes ou cylindriques. Afin de traiter les surfaces complexes, le meulage, la tribofinition ou encore le polissage sont plus adaptés. Ces procédés dédiés aux surfaces complexes disposent cependant d'inconvénients qualitatifs. Le meulage permet d'obtenir des rugosités arithmétiques R_a situées entre $12,5 \mu\text{m}$ et $1,6 \mu\text{m}$ ce qui demeure insuffisant pour la plupart des applications. La tribofinition, quant à elle, comporte une qualité dimensionnelle non maîtrisée. L'opération de polissage peut être effectuée manuellement ou automatiquement à partir de technologies abrasives ou électrochimiques.

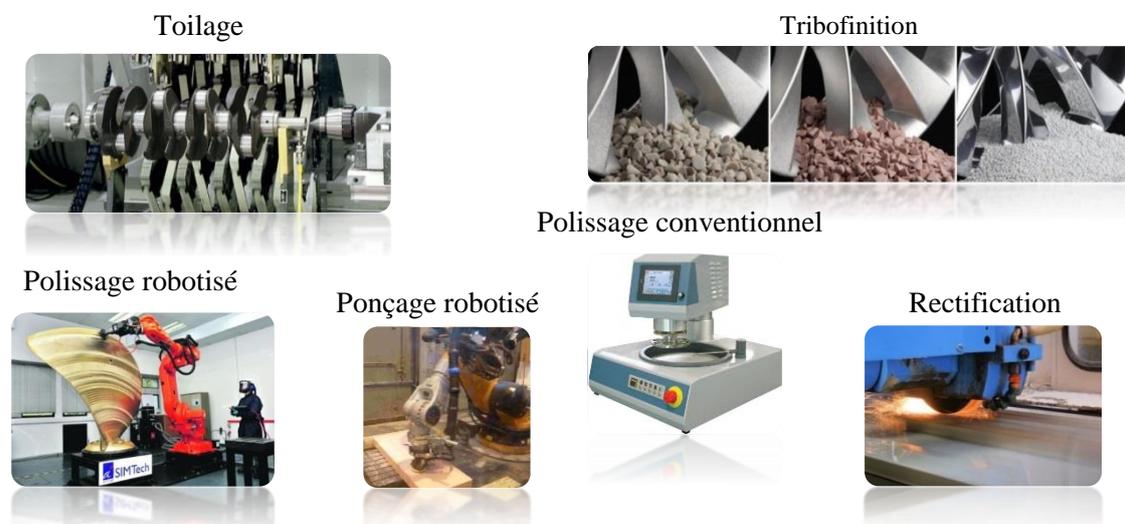


Figure 1.1: exemples de procédés de parachèvement

Néanmoins, ces deux techniques comportent des inconvénients qualitatifs et/ou productifs. L'automatisation du polissage abrasif nécessite un asservissement de position par retour d'efforts, en vue de maintenir le contact, afin d'éviter un enlèvement excessif de matière. Si l'effort est maintenu constant, la pression de contact et donc l'enlèvement de matière risquent d'être variables compte tenu d'une géométrie complexe, ce qui constitue un risque pour la forme géométrique finale.

Concernant le polissage électrolytique ou électrochimique (Figure 1.2), les surfaces à traiter parcourent divers bains chimiques. Cette technologie de polissage emploie des produits chimiques ainsi que du courant électrique, ce qui est le principal inconvénient de cette technologie du fait de l'impact environnemental. Durant le procédé, la pièce à traiter est suspendue à un support conducteur relié au pôle positif (anode). Les pôles sont immergés dans un bain chimique conducteur, composé d'acide phosphorique, sulfurique et nitrite. Grâce à la différence de potentiel entre l'anode et la cathode, les sommets de la topographie traitée sont éliminés, ce qui conduit à une réduction de la rugosité de la surface.

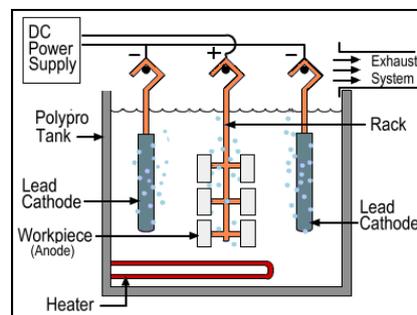


Figure 1.2: principe du procédé électrochimique

De par un fort besoin de parachèvement et compte tenu des limites des procédés de polissage, il devient nécessaire d'investiguer des procédés innovants afin d'optimiser la qualité finale ainsi que les temps de production.

1.5 Principe du polissage laser et applications

Utilisée il y a quelques années dans le domaine de l'optique pour le polissage du diamant [Erdemir1997, Gloor1999], des lentilles optiques [Bol'shepaev1997], ou encore dans le domaine de l'électronique pour l'aplanissement de fines feuilles d'or [Tuckerman1986], le polissage laser tend à se développer de plus en plus vers le polissage des métaux, permettant de réaliser des temps d'opération situés entre 10 et 200 s/cm² selon la topographie initiale [Willenborg2007]. Les avantages de ce procédé portent sur son automatisation, sur l'accessibilité des surfaces de faibles courbures du fait d'un diamètre de faisceau laser proche du millimètre, sur son faible impact environnemental et sur la possibilité de traiter des matériaux de très haute dureté.

Trois principales variantes du procédé de polissage laser sont identifiées (Figure 1.3). Dans un premier temps, on trouve le polissage laser par ablation de larges surfaces. En second lieu, on trouve le polissage par ablation localisée et enfin, le polissage par refusion de la matière [Willenborg2007].

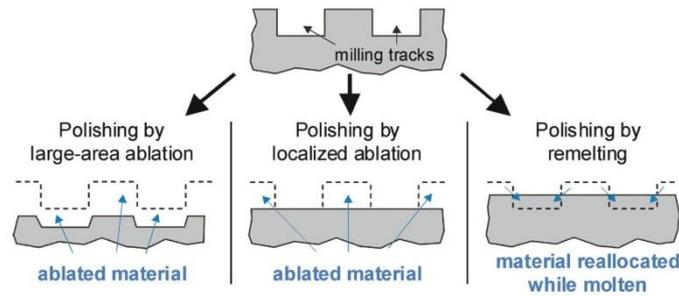


Figure 1.3: variantes du procédé de polissage laser

Le polissage laser par ablation de larges surfaces permet d'éliminer la matière sur l'ensemble de la surface traitée. Cette variante permet de diminuer l'amplitude de la topographie par une ablation des pics plus prononcée que l'ablation des vallées.

Le polissage laser par ablation localisée permet d'éliminer seulement les pics à partir d'un contrôle du laser. Cependant, cette technologie nécessite une mesure précise de la topographie initiale.

Le polissage laser par refusion permet la relocalisation des pics à l'intérieur des cavités. En parcourant la surface à traiter, le laser met en fusion les pics de la surface grâce à l'énergie qui est transmise au matériau. Les tensions de surfaces permettent de propager la matière des pics fondus dans les cavités, ce qui conduit à un lissage de la surface (Figure 1.4). Le résultat final est fonction de plusieurs paramètres essentiels, comme les paramètres opératoires du laser, le matériau, mais aussi la topographie de la surface initiale ainsi que la trajectoire employée [Willenborg2007, Khalid Hafiz2012]. Le procédé de polissage laser nécessite une source d'énergie, généralement un laser, et un porteur. Le laser peut être positionné sur un robot 6 axes articulé ou une machine à commande numérique 5 axes.

Deux types de laser peuvent être utilisés : le laser pulsé [Perry2009] dans le cas du micro-polissage et le laser continu pour le macro-polissage [Kumstel2013]. Concernant le micro-polissage, les profondeurs de fontes se situent entre 0,5 et 5 μm , contre 20 à 200 μm pour le macro-polissage [Willenborg2007]. Le micro-polissage est utilisé pour des rugosités initiales de l'ordre de 0,3 à 1 μm et le macro-polissage est employé pour des rugosités initiales plus importantes. Autrement dit, le micro-polissage donne des rugosités de surfaces plus fines que le macro-polissage. Pour certaines qualités finales désirées la combinaison des deux variantes peut être utilisée.

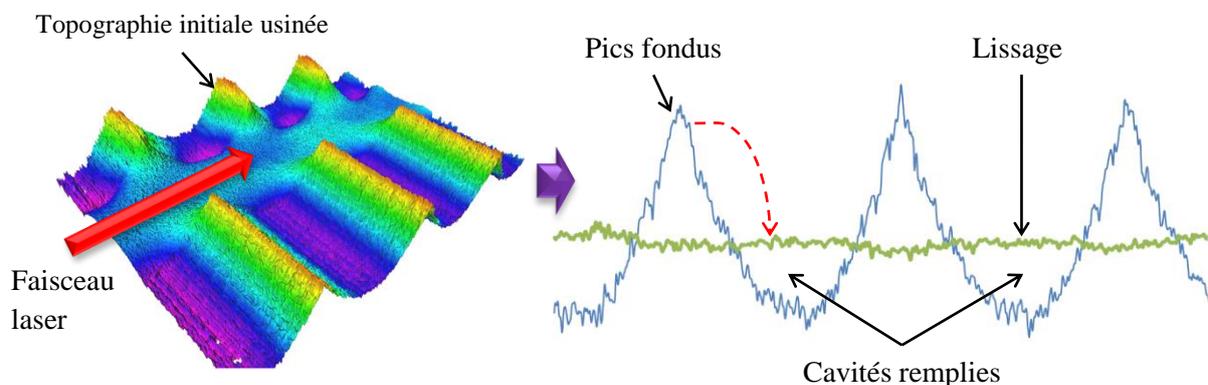


Figure 1.4: principe du procédé de polissage par laser

Le polissage laser se compose de différents paramètres opératoires comme la puissance (P) en Watt, l'avance (V_f) en mm/min, l'offset (O_f) en mm, l'overlap (O_v) en % et la stratégie. L'offset est la distance entre le point focal du laser et la surface. L'overlap est le taux de recouvrement de la deuxième passe sur la première. La stratégie concerne la façon de parcourir la surface, ZIG ZIG, ZIG ZAG, perpendiculaire à la surface etc...

La puissance et l'avance peuvent être liées linéairement par un seul paramètre qui est la densité d'énergie (E) en J/Cm² (Eq.1.1). Le micro-polissage dispose d'un paramètre supplémentaire au macro-polissage : la durée de pulsation qui est exprimée en milli ou en nano secondes.

$$E = \frac{6000 * P}{D * V_f} \quad \text{Eq.1.1}$$

Avec D le diamètre du faisceau laser (mm).

Le polissage laser est applicable à toute pièce nécessitant une opération de finition à des fins esthétiques ou tribologiques. Les domaines d'applications demeurent relativement larges, et sont composés du biomédical (Figure 1.5a), de l'aérospatial, du moulage (Figure 1.5b) de l'horlogerie etc...

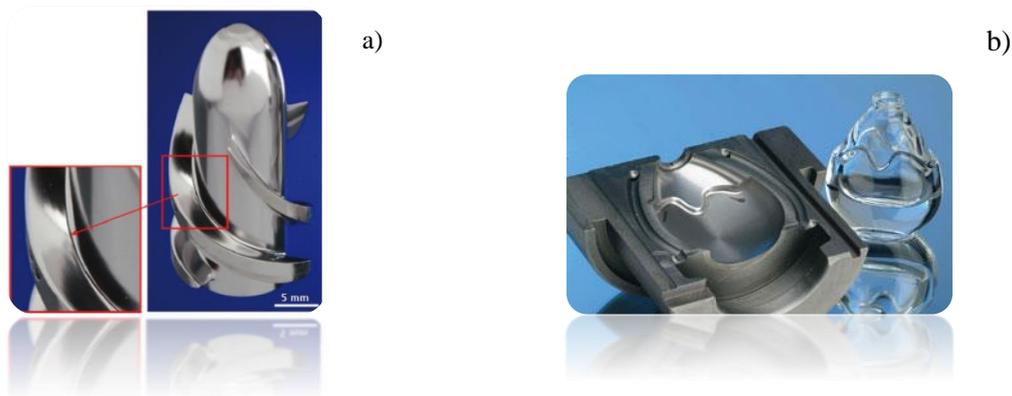


Figure 1.5: exemples de pièces polies par laser pièces d'un système d'assistance cardiaque a), et Moule b)

1.6 Principe général de la fabrication additive et applications

Technologie fondamentalement différente de la fabrication par enlèvement de matière, la fabrication additive connaît un essor considérable depuis ces 10 dernières années pour les matériaux métalliques.

La fabrication additive se base sur différentes technologies, utilisées dans divers domaines. Le principe général de cette technologie s'appuie sur un ajout de matière réalisé couche par couche suivant la hauteur, amenant ainsi à une pièce tridimensionnelle. La fabrication additive permet de travailler une grande diversité de matériaux comme les matériaux alimentaires, biologiques, plastiques ou métalliques (Figure 1.6).

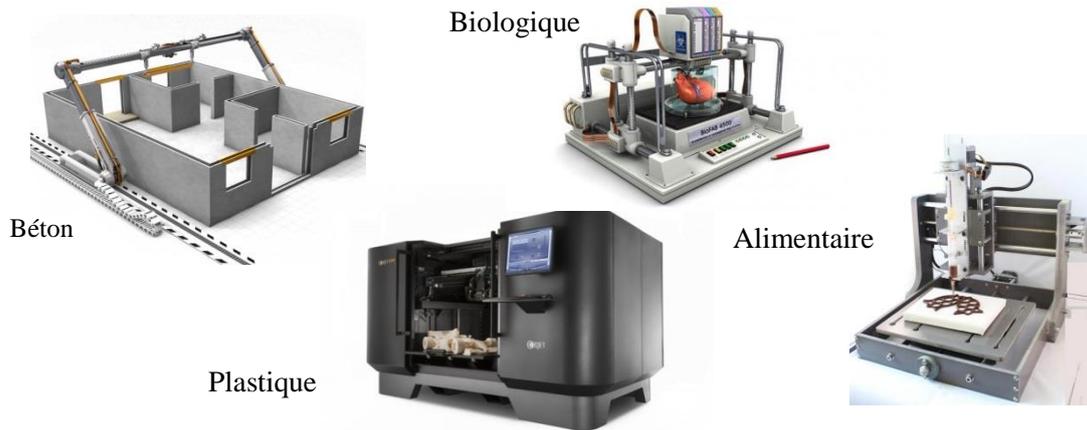


Figure 1.6: exemples de matériaux travaillés en fabrication additive

La fabrication additive comprend l'ensemble des procédés permettant de fabriquer couche par couche, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique [Norme NF E 67-001]. Il est possible de générer un programme de commande à partir du modèle 3D de la pièce à obtenir en vue de piloter la machine à commande numérique et ainsi obtenir la pièce physique.

Concernant la fabrication additive de pièces métalliques, deux technologies majeures existent. On retrouve la fabrication additive par lit de poudres (Selective Laser Sintering) et la fabrication additive par projection de poudres (Direct Metal Deposition). Généralement basées sur une source laser ou par faisceau d'électrons, ces deux technologies permettent de fondre la poudre métallique couche par couche, ce qui permet de créer des pièces fonctionnelles en trois dimensions applicables à divers domaines, comme le sport, l'automobile, l'aéronautique ou encore le biomédical (Figure 1.7).



Figure 1.7: exemples de pièces métalliques obtenues par fabrication directe

Dans le cas de la technologie SLS, la poudre métallique est finement étalée sur un plateau, puis fondue grâce à l'énergie laser ou par faisceau d'électrons. Suite à la descente du plateau, la poudre est à nouveau étalée puis fondue. La répétition de ces deux opérations permet de créer couche après couche la pièce désirée en trois dimensions (Figure 1.8).

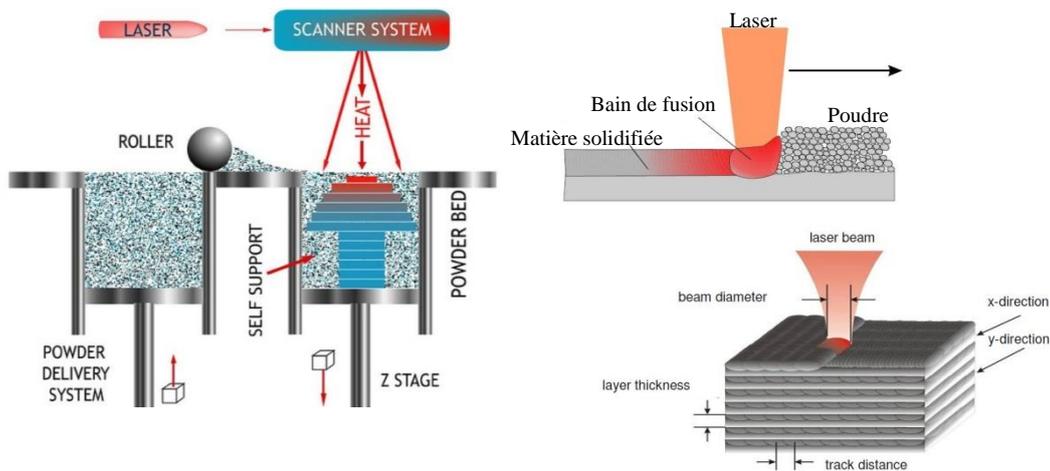


Figure 1.8: principe de la technologie de fabrication additive par lit de poudres

Dans le cas de la technologie DMD, la poudre métallique est directement projetée sur le point focal du laser à travers la buse (Figure 1.9). Après chaque dépôt de matière, la buse effectue un déplacement suivant la hauteur, ce qui permet de superposer les couches de matière et donc de créer une forme tridimensionnelle. La technologie par projection de poudres peut être effectuée à travers deux architectures de porteurs différents tels qu'une machine-outil à commande numérique 5 axes ou un robot anthropomorphe 6 axes.

Les avantages de ces technologies de fabrication additive portent sur la possibilité de créer des pièces de formes complexes, mais aussi sur la création de pièces de sections minces. Comparé à la technologie SLM, le procédé DMD permet la fabrication de pièces de plus grandes dimensions ce qui est un avantage pour le domaine de l'aéronautique par exemple. De plus, grâce à cette technologie il est possible de créer des gradients de matériaux [Muller2013] permettant de nouvelles perspectives de fabrication et d'optimisation fonctionnelle.

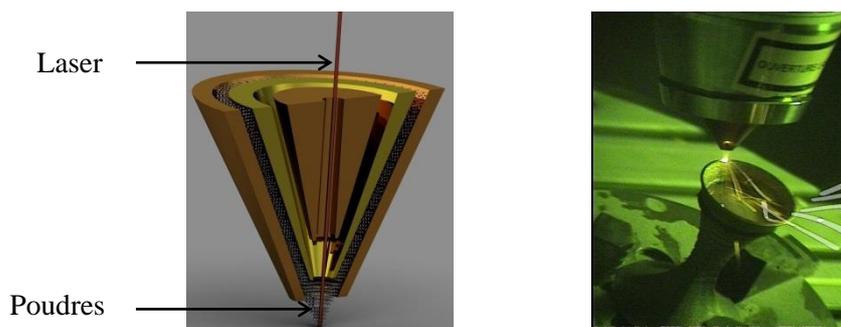


Figure 1.9: principe de la technologie de fabrication additive par projection de poudres métalliques

1.7 Conclusion

Compte tenu des limitations des procédés de parachèvement traditionnels, du besoin d'optimisation des surfaces obtenues par usinage et par fabrication directe par projection de poudres, le polissage laser est un candidat potentiel notamment dans un cadre de fabrication de pièces de formes complexes. Dans une optique de maîtrise globale de fabrication, il est judicieux de proposer une méthodologie de détermination des paramètres opératoires en cohérence avec les caractéristiques attendues de la pièce.

Chapitre 2 : état de l'art et positionnement des travaux

2.1	Introduction	10
2.2	Approche expérimentale.....	10
2.2.1	Macro-polissage de lignes.....	10
2.2.2	Macro-polissage de surfaces	13
2.2.2.1	Conclusion	16
2.2.3	Micro-polissage.....	17
2.2.3.1	Conclusion	19
2.2.4	Stratégie dual-Beam.....	19
2.2.5	Conclusion générale sur l'approche expérimentale	20
2.3	Modélisation et simulation	20
2.3.1	Modélisation expérimentale.....	20
2.3.1.1	Conclusion	22
2.3.2	Modélisation analytique	22
2.3.3	Modélisation géométrique.....	22
2.3.4	Modélisation et simulation multi-physique	23
2.3.4.1	Conclusion	25
2.3.5	Génération de trajectoires	25
2.3.6	Conclusion générale sur la modélisation et la simulation.....	26
2.4	Analyse du matériau après polissage laser	27
2.5	Optimisation suivant une approche multi-process.....	28
2.5.1	Conclusion	29
2.6	Polissage laser de pièces obtenues par fabrication directe	30
2.6.1	Conclusion	33
2.7	Polissage laser de formes complexes.....	33
2.8	Synthèse de l'état de l'art et verrous scientifiques	34
2.9	Positionnement des travaux de recherche.....	35

2.1 Introduction

Ce second chapitre a pour objectif le positionnement de ces travaux de thèse par rapport à l'état de l'art et cela dans un contexte de fabrication multi-process de pièces de formes complexes.

Le procédé de polissage laser se divise selon deux variantes, qui sont le macro-polissage et le micro-polissage. Compte tenu des profondeurs de fontes plus conséquentes comparées au micro-polissage, le macro-polissage est adapté aux topographies initiales de qualité d'ébauche. Le micro-polissage intervient quant à lui suite à une étape de semi-finition, c'est-à-dire en fin de chaîne de fabrication. La variante de macro-polissage est plus adaptée aux topographies de faibles qualités, comme les surfaces obtenues par projection de poudre ou encore les surfaces usinées ébauchées. Ainsi, le présent chapitre se focalise essentiellement sur le procédé de macro-polissage tout en évoquant le micro-polissage laser.

Quelle que soit la variante du procédé utilisée, l'optimisation du procédé est généralement effectuée sur une ligne, puis sur une surface et cela selon différentes approches. Souvent utilisée, l'approche expérimentale permet de déterminer la position du domaine de faisabilité du procédé en vue de mieux cibler le domaine optimal. Dans une démarche d'optimisation plus avancée et en vue de maîtriser le procédé, des outils de modélisation et de simulation sont employés.

La première partie de ce chapitre présente une vision générale de la faisabilité du procédé de polissage laser selon une approche expérimentale. Cette partie a pour objectif d'introduire des notions du procédé ainsi que les optimisations effectuées par la communauté scientifique en vue de mieux appréhender les problématiques.

La seconde partie se focalisera sur la modélisation et la simulation du procédé en vue de mieux comprendre les phénomènes impliqués lors du processus. Seront détaillés dans cette partie les différentes méthodes de modélisation et d'optimisation utilisées par la communauté scientifique.

Une troisième partie présentera une analyse de l'intégrité de surface après polissage laser qui est une fonction objectif non négligeable concernant la fonctionnalité des surfaces.

L'avant dernière partie analysera les études qui se positionnent dans un contexte multi-process de fabrication de pièces de forme complexe suivant les procédés de fabrication directe et d'usinage.

Enfin, le dernier point de ce chapitre se concentrera sur la mise en avant des verrous scientifiques relevés dans la bibliographie ainsi que sur le positionnement de ces travaux de recherche.

2.2 Approche expérimentale

2.2.1 Macro-polissage de lignes

Basé sur la fusion du matériau, le procédé de polissage laser met en avant deux mécanismes de fonte bien distincts [Ramos2002] :

- Le régime *SSM* (Shallow Surface Melting)
- Le régime *SOM* (Surface Over-Melt)

Le régime *SSM* est caractérisé par un volume fondu inférieur au volume des cavités à remplir, ce qui permet le lissage de la surface par un transfert du volume des pics vers le volume des cavités. Le volume liquide s'écoule vers les cavités à travers un gradient de tension superficielle et la gravité. Ce régime est particulièrement adapté aux surfaces obtenues par fabrication additive (SLM), qui sont composées d'agrégats de sphères de différentes tailles [Ramos2002]. Le régime *SSM* est caractérisé par une avance élevée et une faible puissance menant ainsi à une épaisseur fondu relativement mince.

Dans le cas du régime *SOM*, le volume de fonte est supérieur au volume des cavités. Dans ce cas, la topographie initiale disparaît laissant place à un bain de fusion. On observe alors la création d'un gradient thermique entre le laser et le front de solidification, ce qui crée une surface finale ondulée (Figure 2.1). Le mouvement du laser détermine l'écoulement de la matière en fusion [Ramos2002]. La surface présente des longueurs d'ondes plus petites que la topographie initiale, mais se compose d'amplitudes plus conséquentes ce qui augmente la rugosité finale.

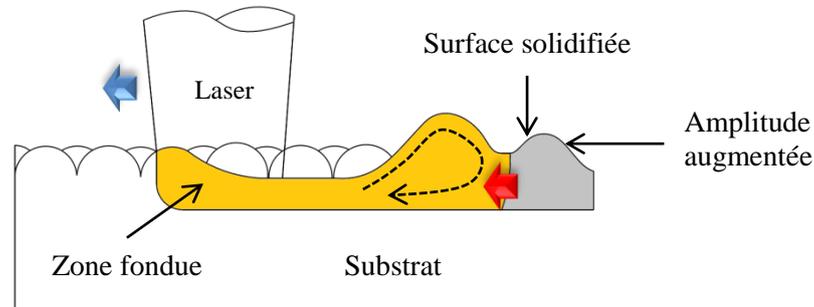


Figure 2.1: principe du régime SOM

La première étape d'optimisation consiste généralement à optimiser la puissance, l'avance et l'offset sur des lignes polies par laser en vue d'obtenir le meilleur lissage possible. Ainsi, Ukar. E. et al. [Ukar2009] déterminent expérimentalement la meilleure combinaison de ces trois paramètres (Figure 2.2) appliqué à un acier outil de type Z 160 CDV 12. Le procédé de polissage laser est appliqué à une surface initiale obtenue par fraisage à l'aide d'une fraise hémisphérique, identiquement à un cas d'usinage de formes complexes. L'optimisation de la topographie est caractérisée par une diminution des amplitudes et de la fréquence, ce qui conduit à un lissage. La rugosité arithmétique (R_a) (Eq.2.1) ainsi que son pourcentage de réduction (Eq.2.2) sont utilisés afin de caractériser la topographie finale et l'optimisation. Le R_a quantifie la hauteur moyenne de la topographie sur un profil, mais ne renseigne aucunement sur la répartition spatiale de la surface et ne permet pas de distinguer les pics des cavités.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Z(x)| dx \quad \text{Eq.2.1}$$

$$\text{Réduction de la rugosité [\%]} = \frac{R_{a \text{ initial}} - R_{a \text{ poli}}}{R_{a \text{ initial}}} \quad \text{Eq.2.2}$$

Dans le cas d'une topographie finale non optimale, la topographie initiale reste présente après passage du faisceau laser (Figure 2.3). Ce phénomène est mis en avant par la persistance de la fréquence initiale régulière, dans le cas d'une surface initiale usinée. Pour une puissance trop élevée, le mécanisme thermodynamique du procédé entre dans un régime SOM, donnant ainsi une topographie finale non optimale (Figure 2.4).

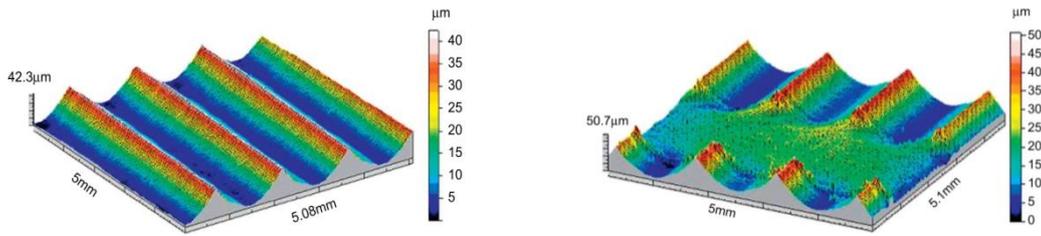


Figure 2.2: topographie initiale (gauche) et ligne polie par laser optimisée (droite) ($P = 750\text{W}$; $V_f = 1920\text{ mm/min}$, $O_f = 20\text{ mm}$)

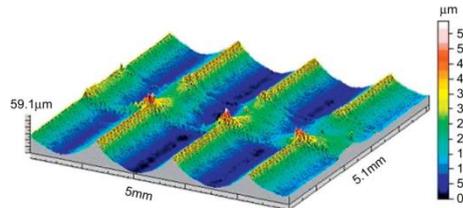


Figure 2.3: cas d'une topographie non optimale

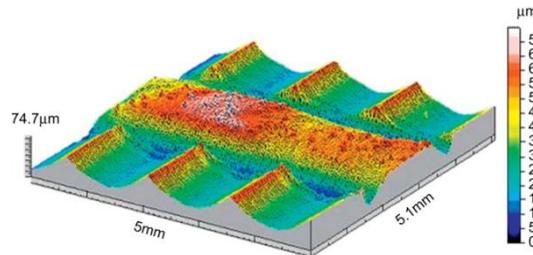


Figure 2.4: topographie finale pour une puissance trop élevée (950 W)

Toujours dans une optique d'optimisation de la topographie finale N.I. Marinescu et al. [Marinescu2008] étudient différents paramètres de polissage laser appliqués sur trois matériaux. Les auteurs étudient un alliage d'acier pour outils (ORVAR Steel), un acier de type CC45 et un alliage d'acier et bronze (LaserForm ST100). Les trois échantillons sont obtenus selon trois procédés primaires différents : l'usinage, l'électroérosion et la fabrication additive par lit de poudre. Les auteurs déterminent ainsi les paramètres optimaux selon la puissance du laser, l'avance et la capacité d'absorption des différents matériaux (Figure 2.5). Le pourcentage de réduction de rugosité optimal est de 70% pour la topographie initiale usinée. L'étude met en avant des plages efficaces de paramètres à savoir une puissance située entre 1200 et 1700 W, une avance située entre 1300 et 1500 mm/min et un offset efficace situé entre 22 et 40 mm.

Les auteurs mettent en évidence que la capacité d'absorption et l'homogénéité du matériau impactent sur le résultat final. Or, expérimentalement, les échantillons composés de différents matériaux, sont chacun obtenus suivant des procédés primaires différents. Dans ce cas, le résultat final est dépendant du matériau mais aussi de la topographie initiale. En somme, l'analyse écarte totalement l'influence de la topographie initiale.

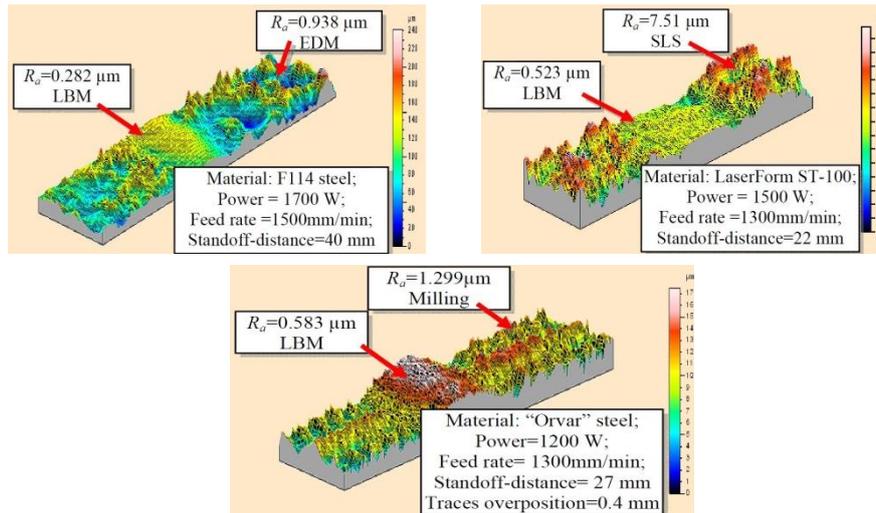


Figure 2.5: paramètres opératoires optimaux déterminés suivant le matériau

2.2.2 Macro-polissage de surfaces

Le traitement d'une surface complète nécessite l'utilisation d'un paramètre supplémentaire : le taux de recouvrement de passe (%). Le taux de recouvrement de passe appelé *Overlap* (O_v), permet de recouvrir la passe N selon une passe supplémentaire $N+1$ en fonction d'un pourcentage de recouvrement (Figure 2.6). Un taux de recouvrement de 100 % signifie que le faisceau laser passe deux fois au même endroit.

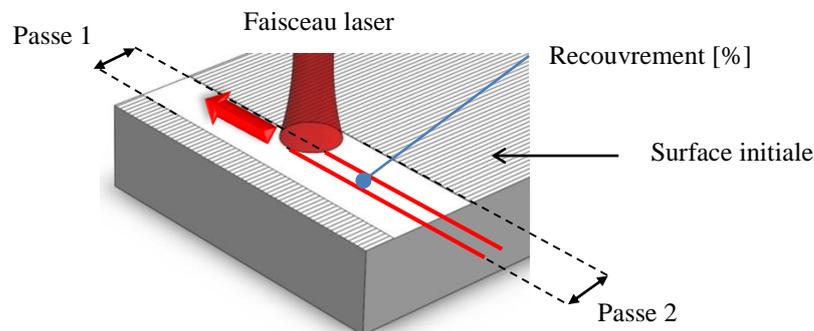


Figure 2.6: principe du taux de recouvrement de passe

A.M. Khalid Hafiz et al. [Khalid Hafiz2012] analysent l'impact du taux de recouvrement sur la surface finale (Figure 2.7) sur un acier outil AISI H13. La topographie finale est caractérisée selon la rugosité surfacique, noté S_a (Eq.2.3) et le paramètre de rugosité classique R_a .

$$S_a = \frac{1}{A} \iint Z(x, y) dx dy \quad \text{Eq.2.3}$$

Les résultats montrent que la qualité de la surface a tendance à augmenter jusqu'à un *Overlap* de 95 %. On observe une diminution de la qualité à partir d'un *Overlap* de 97,5 %. La rugosité surfacique optimale est de 0,23 μm pour un S_a initial de 1,35 μm et une diminution de 86,6 %. Les auteurs insistent sur la non pertinence des paramètres de rugosité (R_a et S_a) pour caractériser les topographies, et proposent une analyse des surfaces à travers les courbes de portances ainsi qu'une étude de l'impact du polissage sur la rugosité et l'ondulation.

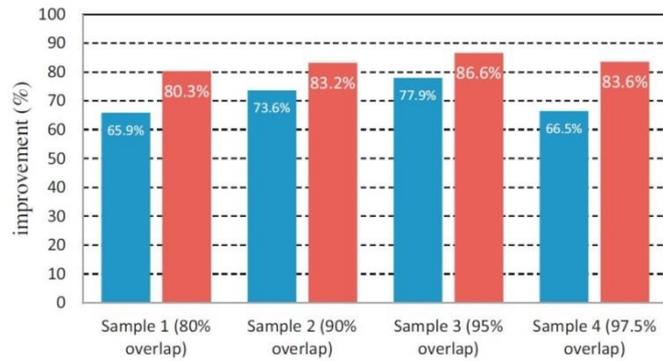


Figure 2.7: impact du taux de recouvrement sur le pourcentage de réduction de rugosité

La topographie d'une surface est une cartographie de coordonnées de points suivant les axes x, y et z, composés d'une amplitude spécifique et d'une distribution statistique spatiale [Whitehouse2003]. En analysant visuellement une topographie initiale et cette même topographie polie par laser suivant un Overlap de 95%, deux changements majeurs sont identifiés (Figure 2.8). Dans un premier temps, l'orientation de la texture est modifiée par le passage du faisceau laser, qui est perpendiculaire à la topographie initiale. Ce phénomène altère la distribution spatiale des composantes périodiques. En addition, la distribution des amplitudes est aussi modifiée. Afin de quantifier l'évolution de la topographie, une analyse de l'amplitude et de la fréquence spatiale sont nécessaires.

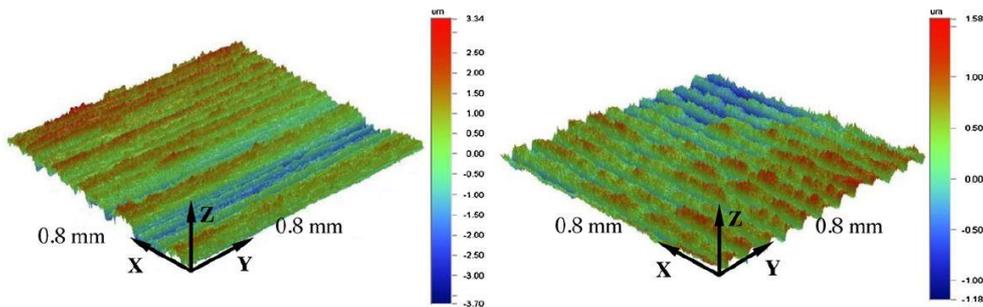


Figure 2.8: comparaison visuelle des topographies avant et après polissage laser suivant un Overlap de 95%

Dans cette optique d'étude d'évolution entre la topographie initiale et la topographie polie par laser, les auteurs utilisent une fonction transfert. Le gain de la fonction transfert est la mesure de la capacité d'un système à transmettre la puissance et ou l'amplitude d'un signal vers la sortie. Le gain minimal indique une meilleure optimisation de la qualité finale (Figure 2.9). Dans cette étude, un Overlap de 95 % permet d'optimiser la qualité finale selon les deux composantes de rugosité et d'ondulation.

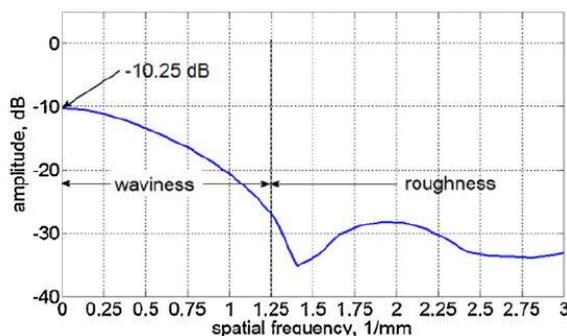


Figure 2.9: fonction transfert pour l'Overlap de 95 %

Enfin, un exemple de topographie optimale polie par laser est présenté (Figure 2.10). Une surface de 50 mm x 25 mm est polie suivant une stratégie ZIG ZAG et cela en multi-passes. La première passe est réalisée avec un laser continu, suivant une densité d'énergie de 3,5 kJ/cm² et un overlap de 95 %, le tout en vue de diminuer l'ondulation de la surface. La seconde passe est réalisée avec un laser pulsé afin de diminuer les hautes fréquences. La première passe permet une diminution de la rugosité surfacique de 83 %, pour un S_a initial de 1,35 μm et un S_a final de 0,23 μm . La seconde passe améliore de 21,7 % pour un S_a final de 0,18 μm et l'optimisation totale est de 86,7 %. Le couplage du macro et du micro-polissage semble être une bonne solution pour l'amélioration de la qualité finale et permet d'optimiser des topographies initiales de très faible qualité.

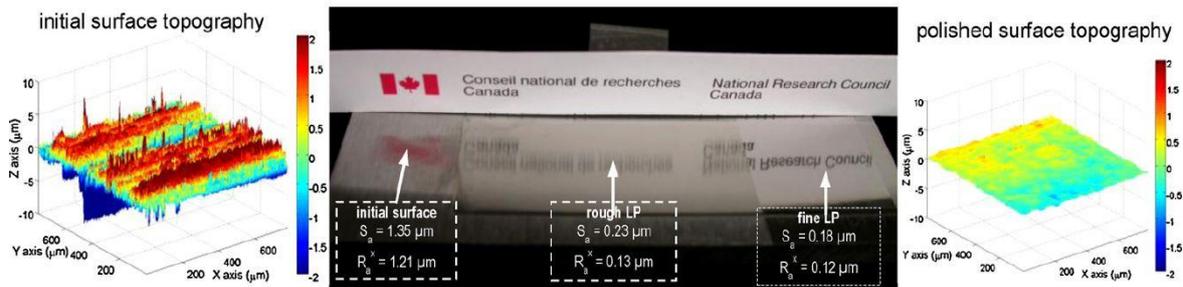


Figure 2.10: optimisation d'une surface polie suivant une stratégie multi-passes effectuée selon un laser continu et pulsé

J. Kumstel et al. [Kumstel2013] étudient le polissage laser du titane (Ti6Al4V) et de l'Inconel 718. La topographie initiale est tournée ou fraisée. Les paramètres opératoires du laser sont la puissance, l'avance, le diamètre du faisceau et le pas de décalage du laser. Le R_a final obtenu pour le titane est de 0,16 μm , pour un R_a initial de 1 μm (surface tournée) (Figure 2.11).

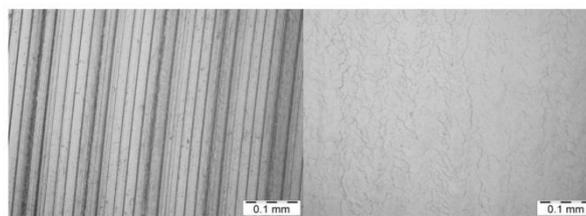


Figure 2.11: topographie initiale tournée (gauche) et topographie finale polie par laser (droite) selon les paramètres optimaux déterminés expérimentalement

Après polissage laser, la topographie du TA6V comporte une structure « étagée » qui est le résultat d'une déformation plastique des grains de la matière causée par les contraintes résiduelles induites par le procédé laser. Ce type de texture peut avoir tendance à dissimuler les traces du faisceau laser, qui sont très peu visibles. Concernant l'Inconel 718, un R_a final de 0,11 μm est obtenu pour un R_a initial fraisé de 1 μm (Figure 2.12).



Figure 2.12: topographie initiale fraisée (gauche) et topographie finale polie par laser (droite) selon les paramètres optimaux déterminés expérimentalement

La topographie initiale semble avoir totalement disparu, en revanche les traces du faisceau laser donnent une texture très directionnelle. Des rugosités finales particulièrement faibles sont obtenues selon un laser continu, ce qui prouve l'efficacité du macro-polissage. Cependant, comme le soulèvent A.M.K. Hafiz et al. [Khalid Hafiz2012], beaucoup d'études ne donnent pas de renseignements sur la valeur du filtre de coupure utilisé pour le calcul du paramètre R_a . Le manque d'information sur le filtre de coupure rend difficile la comparaison entre les différentes études. Aussi, la topographie initiale ainsi que le taux de recouvrement de passe demeurent invariables expérimentalement.

Dans une application automobile, E. Ukar et al. [Ukar2013] étudient la fonte à graphite sphéroïdal de type GGG70L (EN-GJS-700-2) utilisée pour la fabrication de moules et de matrices. La problématique majeure de ce type de matériaux est la présence de graphite. Après passage du faisceau laser le graphite, n'est pas fondu et apparait en surface sous forme d'inclusion. Ce phénomène tend à limiter le processus de lissage de la surface qui dispose d'une rugosité quasi similaire après polissage. Afin de réduire les inclusions de graphite, les auteurs créent une réaction chimique de décarburation. L'étude expérimentale s'appuie sur une surface initiale obtenue selon une fraise hémisphérique de diamètre 12 mm et un pas a_e de 0,6 mm. Les paramètres variables sont, la puissance laser, l'avance et le taux de recouvrement. Une puissance de 250 W, une avance de 100 mm/s et un Overlap de 50 % (Figure 2.13a) permettent d'obtenir un R_a final optimal de 0,5 μm , pour un R_a initial de 4,35 μm (Figure 2.13b) amenant à un pourcentage de réduction de R_a de 88,3%. Les auteurs concluent que l'augmentation du taux de recouvrement a tendance à privilégier un régime SOM et engendre une diminution de l'optimisation. Une productivité de 20 s/cm² est atteinte en privilégiant la qualité finale de la surface et une productivité de 50 s/cm² est obtenue suivant un Overlap de 30 % ce qui montre l'importance de l'Overlap quant à la productivité.

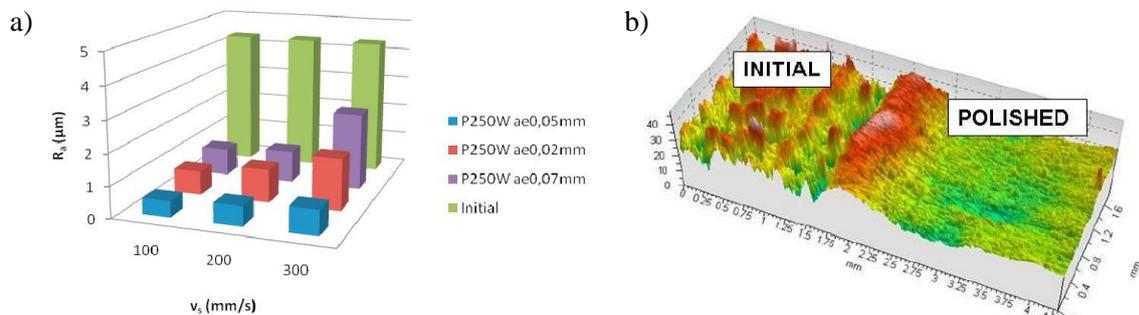


Figure 2.13: évolution de la rugosité finale selon les paramètres opératoires

2.2.2.1 Conclusion

Le polissage laser de lignes est la première étape d'optimisation du procédé de polissage par laser mais ne permet pas de traiter une surface complète, ce qui limite grandement l'industrialisation du procédé. Dépendant des paramètres opératoires, l'optimisation peut être effectuée grâce à un régime de fonte particulier : le régime SSM.

Le polissage laser de surfaces fait intervenir un paramètre opératoire supplémentaire : le taux de recouvrement de passe. Ce paramètre permet de traiter une surface complète et influence la texture et l'amplitude de la topographie initiale. Optimisé, l'Overlap permet d'obtenir des qualités finales très acceptables d'un S_a de l'ordre de 0,23 μm .

Enfin, dans une optique d'optimisation globale, peu d'études prennent en considération la topographie initiale ce qui limite la maîtrise du procédé quant à la fonctionnalité de la pièce finale.

2.2.3 Micro-polissage

Compte tenu de ses faibles profondeurs de fontes, le micro-polissage permet une meilleure maîtrise des volumes fondus et est adapté aux topographies initiales semi-finies. Basé sur un laser pulsé, cette variante fait intervenir un paramètre opératoire supplémentaire vis-à-vis du macro-polissage : la durée de pulsation. Le laser pulsé limite la transmission de chaleur appliquée au matériau, ce qui privilégie le régime SSM au Régime SOM et permet d'améliorer le résultat. Dans une optique d'optimisation du procédé de micro-polissage laser, Tyler L. Perry et al. [Perry2007] étudient le polissage laser de pièces micro/macro fabriquées (Figure 2.14). Du fait de leur taille relativement réduite, les pièces micro-fabriquées nécessitent des technologies de finition adaptées ce qui fait du micro-polissage un candidat approprié. Dans cette étude, le micro-polissage permet d'obtenir une rugosité finale de $0,026 \mu\text{m}$ pour une rugosité initiale de $0,175 \mu\text{m}$ (Figure 2.15).

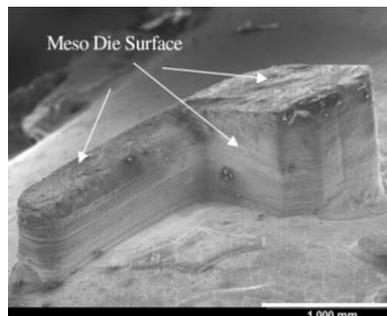


Figure 2.14: pièce micro-fabriquée

L'étude montre que des fréquences de pulsations supérieures à 300 ns sont plus efficaces pour les basses fréquences spatiales situées autour de 200 mm^{-1} . On retrouve ce constat dans les travaux de Nowak et al. [Nowak2006], qui démontrent que les basses fréquences spatiales sont peu sensibles au procédé de fonte, tandis que les hautes fréquences sont significativement affectées par celui-ci.

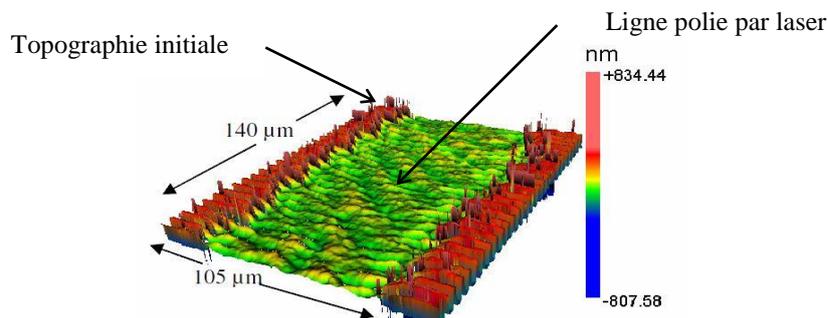


Figure 2.15: échantillon micro-fabriqués poli par laser

Comme la variante de macro-polissage [Perry2009a], une topographie finale non optimale se caractérise dans le cas du micro-polissage par la présence de la topographie initiale, mise en avant par une fréquence quasi identique après passage du faisceau laser (Figure 2.16).

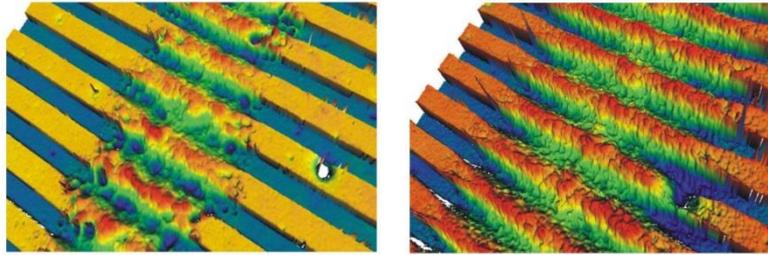


Figure 2.16: topographie polies non optimales

En vue d'optimiser le lissage M.T.C. Chow et al. [Chow2012] utilisent une stratégie multi-passes afin d'augmenter le temps d'interaction entre le laser et la surface. Basé sur l'emploi de paramètres identiques entre chaque passe, ce type de stratégie permet de laisser à la matière en fusion le temps de s'étaler et donc d'optimiser le processus de lissage. Cette stratégie permet d'atteindre une réduction de 63% de la rugosité pour une stratégie de 5 passes contre environ 20 % pour une stratégie simple. Cependant, l'étude montre une limitation de l'efficacité à partir de 5 passes (Figure 2.17). Ces mêmes auteurs analysent en effet le micro-polissage laser suivant différentes topographies initiales, et mettent en avant l'impact de la surface initiale sur le résultat final. L'ordre de grandeur des topographies initiales étudiées est largement inférieur à celles utilisées pour le macro-polissage, ce qui ne permet pas d'extrapoler le comportement et les paramètres opératoires au cas du macro-polissage.

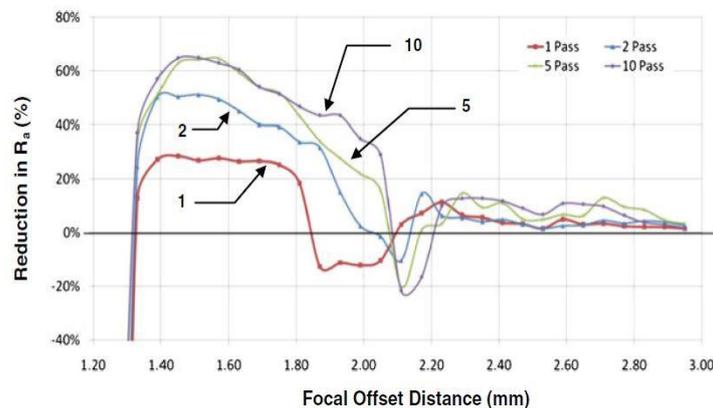


Figure 2.17: impact de la stratégie multi-passes sur la réduction de rugosité

F. E. Pfefferkorn et al. [Pfefferkorn2013] se focalisent aussi sur une stratégie multi-passes de micro-polissage, mais cela en faisant varier les paramètres opératoires entre deux passes. Ainsi, les auteurs introduisent deux régimes distincts : le régime thermo-capillaire et le régime capillaire. Ces régimes permettent d'obtenir une réduction des basses et hautes fréquences et un R_a final de 47 ± 5 nm pour un R_a initial de 172 ± 25 nm.

Une autre étude met en avant l'importance sur le résultat final de la distribution de la densité d'énergie [Nüsser2011], ce qui souligne la multitude de paramètres à prendre en considération pour maîtriser le procédé de finition laser.

Enfin, dans une optique d'intégration industrielle du procédé de micro-polissage laser et de texturation, A. Temmler et al. [Temmler2011] proposent une méthodologie de processus sélectif. La méthodologie s'appuie sur de l'analyse d'image, qui permet de repérer les zones à traiter (Figure 2.18).

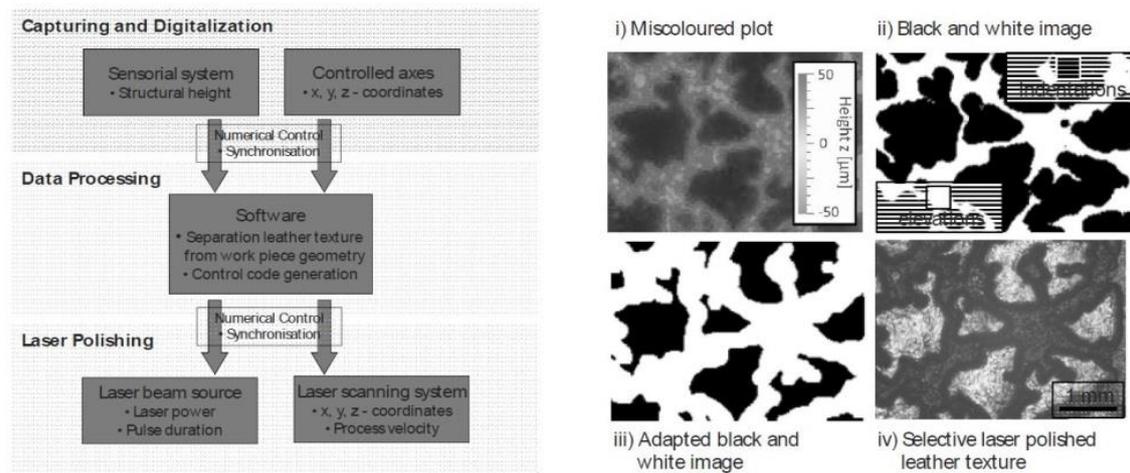


Figure 2.18: méthodologie et étapes du processus de traitement laser sélectif

Les auteurs présentent des surfaces texturées par laser (Figure 2.19). Ce procédé de traitement de surface laser permet d'obtenir des textures périodiques et aperiodiques grâce à la modulation de la puissance. Cette application met en avant les différentes possibilités du procédé laser, qui peuvent s'intégrer pleinement au sein de la chaîne de fabrication.

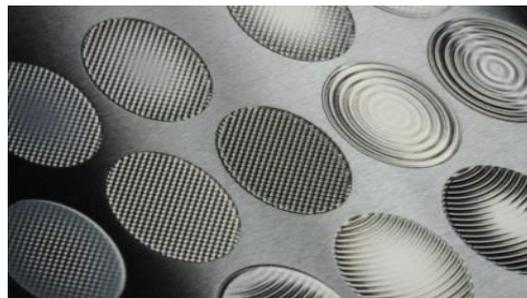


Figure 2.19: surface texturée par laser

2.2.3.1 Conclusion

De par un volume de fonte relativement restreint, le procédé de micro-polissage permet une meilleure maîtrise du volume fondu. Cette variante du polissage laser permet d'obtenir des surfaces finales de faible rugosité pour des surfaces initiales semi-finies, ce qui la positionne en fin de chaîne de fabrication. Ainsi, la chaîne de fabrication est susceptible de faire intervenir hiérarchiquement les deux variantes de polissage laser en fonction de la qualité dictée par le cahier des charges. Le cas échéant, si besoin il est possible d'appliquer le micro-polissage laser à des surfaces obtenues par macro-polissage.

2.2.4 Stratégie dual-Beam

Introduisant une autre alternative au procédé, C. Nüsser et al. [Nüsser2013] utilisent une stratégie basée sur deux faisceaux laser (Laser continu et pulsé) en vue de préchauffer la pièce avant polissage (Figure 2.20). Le principe consiste à préchauffer la pièce grâce au laser continu, puis à polir la surface à travers le laser pulsé. Une stratégie suivant deux lasers permet d'augmenter le temps entre la fin des pulsations et la solidification du bain de fusion. Cela entraîne la diminution des amplitudes sans impact négatif du faisceau laser. De plus, la faible montée en température permet de diminuer l'influence de l'hétérogénéité de la distribution de

densité d'énergie. Les deux lasers sont appliqués à une surface initiale obtenue par tournage sur acier de type X38CrMoV5-1 (AISI H11) et du titane TiAl6V4.

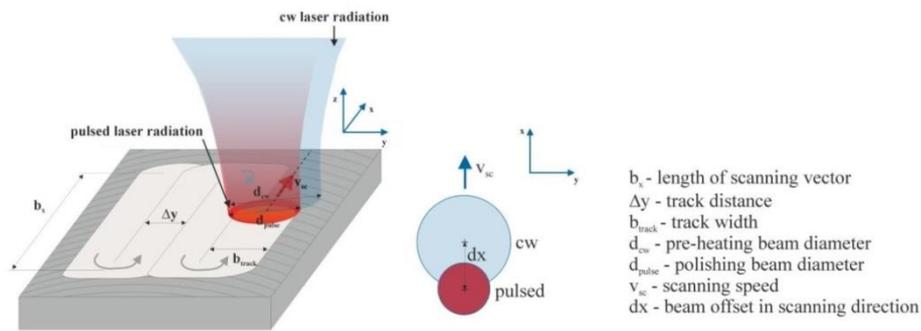


Figure 2.20: principe de la stratégie dual-beam

Pour le titane la stratégie *dual-beam* améliore la macro-rugosité avec l'augmentation du préchauffage. La diminution de l'avance permet d'améliorer la macro-rugosité, mais cette action n'a pas d'effet sur la micro-rugosité. Concernant l'acier outil, la préchauffe n'a pas d'effet significatif. Globalement, la stratégie *dual-beam* n'entraîne pas d'amélioration du lissage de la surface pour l'acier outil, qui subit une augmentation de la martensite.

2.2.5 Conclusion générale sur l'approche expérimentale

L'approche expérimentale permet de localiser le domaine de faisabilité et de s'approcher du domaine optimal du procédé, tout en apportant de la connaissance sur le système, notamment sur les paramètres opératoires qui interviennent dans la maîtrise du procédé. Cependant, peu d'études portent un regard global sur le procédé en intégrant la pièce conformément à un contexte réel, ce qui tend à limiter la généralisation et donc l'utilisation.

2.3 Modélisation et simulation

2.3.1 Modélisation expérimentale

Afin de déterminer le pourcentage de réduction de rugosité suivant la puissance et l'avance, Ukar et al. [Ukar2009] mettent en place un modèle statistique à partir d'une base de données expérimentale, dans le cas du traitement d'un acier outil DIN 1.2379. Grâce à une régression quadratique entre les données, la méthode des surfaces de réponses permet de déterminer la position du domaine optimal au sein du domaine expérimental (Figure 2.21).

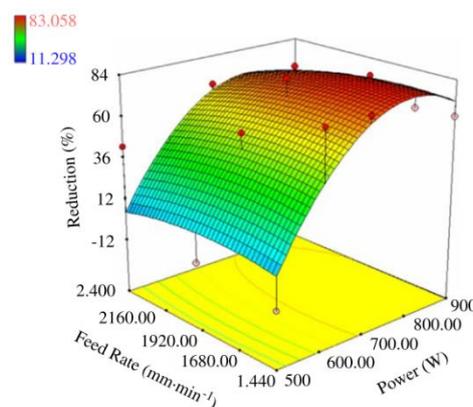


Figure 2.21: détermination des paramètres optimaux selon la méthode des surfaces de réponses

La surface de réponse préconise des valeurs de puissances situées entre 700 et 900W. Concernant l'avance, des valeurs de 1900 mm/min ont tendance à améliorer le résultat final. La combinaison optimale permet d'atteindre un pourcentage de réduction de la rugosité de 85,9%, pour une rugosité initiale de 7,07 μm et une rugosité finale de 0,86 μm . Les auteurs préconisent des densités d'énergies de l'ordre de 1172 J/cm². Cependant, le modèle proposé ne prend pas en compte la topographie initiale ni l'Overlap, ce qui limite fortement l'industrialisation du procédé.

Parallèlement, il est mis en avant une différence d'efficacité suivant le type de laser utilisé [Ukar2010a]. Les types de laser utilisés dans l'étude sont le laser CO₂ et le laser HDPL (High Power Diode Laser). Les surfaces de réponses montrent clairement deux positions différentes du domaine optimal en fonction du laser utilisé (Figure 2.22).

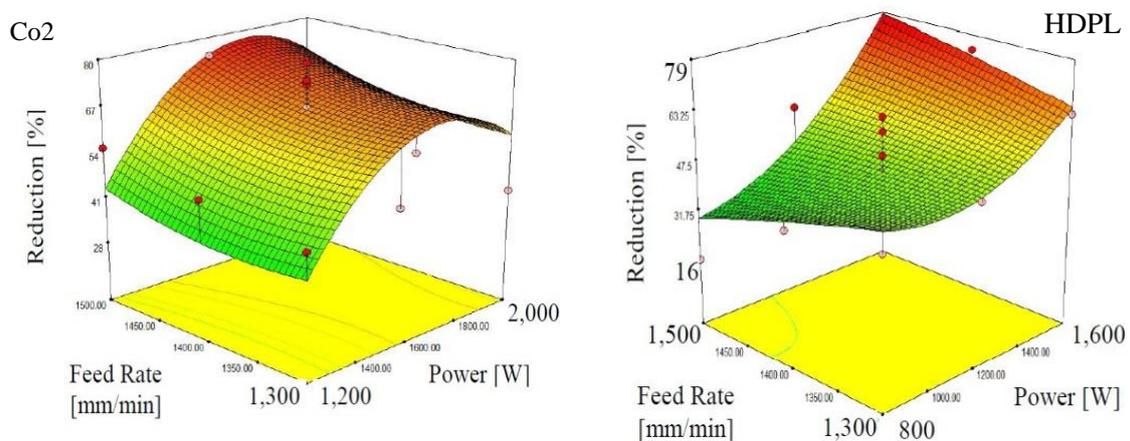


Figure 2.22: surfaces de réponses suivant le laser utilisé

En comparant l'efficacité du type de laser sur un matériau identique, E. Ukar et al. montrent que le laser HDPL est plus efficace que le laser CO₂ (Figure 2.23). L'efficacité du laser est fonction de la longueur d'onde de celui-ci et de la capacité d'absorption du matériau. Ainsi, l'optimisation de la surface finale est fonction des paramètres du procédé mais aussi du matériau.

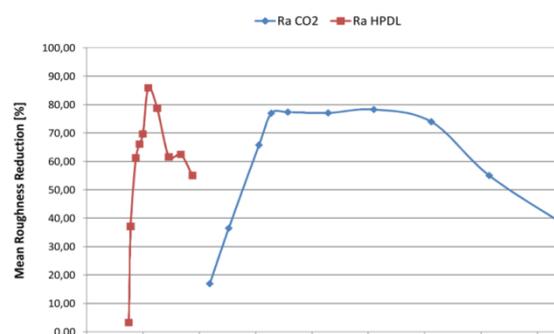


Figure 2.23: efficacité du type de laser sur le pourcentage de réduction de rugosité

Ces auteurs [Ukar2010] mettent en place le même type de modèle en vue de prédire le pourcentage de réduction de R_a en fonction de la densité d'énergie. Dans ce cas, le matériau étudié est de type DIN 1.2379 et la surface initiale est usinée. Le modèle construit comporte une erreur prédictive de 10% (Figure 2.24). Cependant, la topographie initiale est fixe lors de la campagne expérimentale, ce qui exclut cette dernière de la modélisation, le modèle n'est fonctionnel que sur une ligne polie. Le modèle s'appuie sur la densité d'énergie du faisceau laser, qui lie linéairement la puissance et l'avance. Dans ce cas, une valeur de densité d'énergie

peut être obtenue avec plusieurs combinaisons de puissance et d'avance. De ce fait, le résultat final peut différer selon les combinaisons de paramètres utilisées, ce qui fausse la capacité prédictive du modèle.

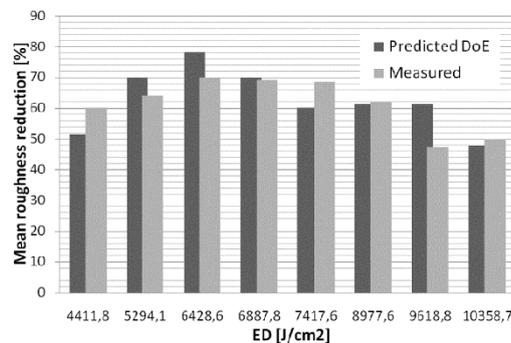


Figure 2.24: validation expérimentale du modèle de prédiction statistique

2.3.1.1 Conclusion

La modélisation expérimentale permet de déterminer la position du domaine optimal grâce aux surfaces de réponses et aux graphes des effets. Cependant, les études existantes n'intègrent pas le taux de recouvrement ni la topographie initiale dans les modèles proposés.

2.3.2 Modélisation analytique

Le procédé de polissage laser peut être considéré comme un système dynamique entrée / sortie [Chow2010]. Dans ce cas, l'entrée est la topographie initiale et la sortie la topographie finale (Figure 2.25). Les topographies initiales et finales sont obtenues expérimentalement et sont caractérisées statistiquement par la rugosité, la courbe de portance ou encore l'autocorrélation. Parallèlement, le micro-polissage est considéré comme un opérateur dynamique représenté par une fonction transfert.

L'opérateur mathématique $w(\cdot)$ traduit la transformée de la topographie initiale $z(x)$ en une surface polie $h(x)$. Cette transformation peut être décrite par une intégrale de convolution classique. Cette étude montre une nouvelle approche de la modélisation du procédé de polissage laser en vue de prédire le résultat final. Cependant, ce nouvel outil est seulement appliqué aux lignes polies par laser et non aux surfaces.

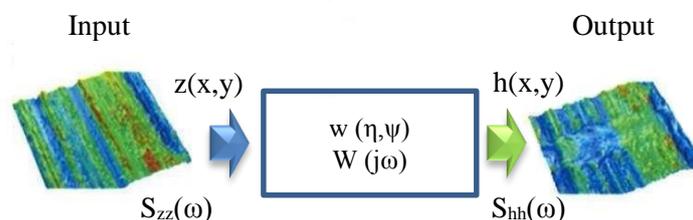


Figure 2.25: système entrée / sortie du procédé de micro-polissage laser

2.3.3 Modélisation géométrique

Shao et al. [Shao2005] proposent une modélisation géométrique simplifiée des aspérités des surfaces initiales, dans le cas des matériaux métalliques et du micro-polissage. Couplée à un modèle thermique, il est alors possible de déterminer la densité d'énergie efficace. Une surface

est généralement composée d'un nombre conséquent d'aspérités. Lors du traitement laser, l'ensemble des aspérités situées sous l'aire du faisceau laser sont irradiées simultanément. Les topographies des surfaces sont souvent homogènes, régulières et composées d'aspérités identiques. Leur amplitude et répartition spatiale sont également homogènes et régulières. Suivant cette logique, les auteurs analysent simplement une aspérité (Figure 2.26).

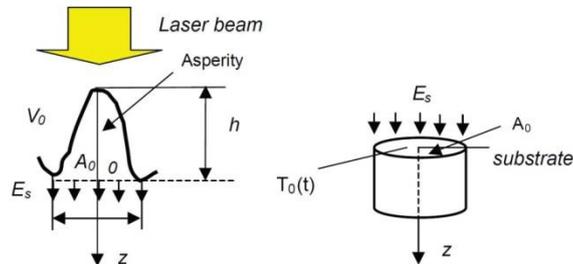


Figure 2.26: principe d'une aspérité irradiée par laser

Avec h la hauteur de l'aspérité, A_0 son aire et V_0 le volume. E_s est l'énergie transmise au substrat sous-jacent à l'aspérité et $T_0(t)$ la température à $Z = 0$.

Le modèle thermique est unidimensionnel et se base sur le volume de l'aspérité (A_0/V_0), modélisé géométriquement par des formes simples (Figure 2.27). Ainsi, il est possible de calculer la densité d'énergie nécessaire en vue de fondre le volume de l'aspérité. La méthodologie proposée montre que la densité nécessaire varie selon le volume de l'aspérité et donc que la topographie initiale a un impact sur le processus de fonte.

Asperity model	Circular cone	Sphere	Cylinder
A_0/V_0	$3/h$	$3/2h$	$1/h$

Figure 2.27: modèles géométriques des aspérités de surface

2.3.4 Modélisation et simulation multi-physique

La simulation numérique du procédé de polissage laser demeure une problématique complexe au vu des phénomènes engendrés par l'action du laser sur le matériau. La simulation numérique est particulièrement intéressante dans la mesure où elle permet de déterminer le domaine optimal et cela sans expérimentation. M. Vadali et al. [Vadali2012 et Vadali2011], mettent en place un modèle de simulation numérique en vue de prédire les surfaces polies par micro-polissage laser. Il est montré par une autre étude plus ancienne [Landau1959] que l'amplitude ζ des fréquences spatiales décroît exponentiellement avec le temps (Eq.2.4).

$$\zeta(t) = \xi(0)e^{-\gamma t} \quad \text{Eq.2.4}$$

Pour pouvoir prédire la rugosité finale, les auteurs utilisent les fréquences spatiales de la topographie initiale, afin de déterminer l'atténuation des amplitudes des hautes fréquences durant le processus de polissage laser. L'atténuation des fréquences spatiales de la surface est fonction de la densité (ρ), de la viscosité du matériau (μ) et du temps (t_m) pendant lequel le matériau reste fondu. Le temps est bien évidemment obtenu par le biais du modèle thermique.

L'atténuation des fréquences est estimée par le filtrage des hautes fréquences, à l'aide du calcul de la fréquence critique (Eq.2.5).

$$f_{cr} = \sqrt{\frac{\rho}{8\pi^2 \mu t_m}} \quad \text{Eq.2.5}$$

Grâce à la fréquence critique et à l'équation, il est possible de déterminer la fréquence spatiale polie par laser (Eq.2.6) à partir d'un filtre passe-bas.

$$\zeta(f_x, f_y)_{polie} = \zeta(f_x, f_y)_{initiale} e^{\left[\left(\frac{f_x}{f_{cr}} \right)^2 + \left(\frac{f_y}{f_{cr}} \right)^2 \right]} \quad \text{Eq.2.6}$$

L'étude porte sur la simulation du nickel, du Ti6Al4V et de l'aluminium Al-6061-T6. Les auteurs comparent les simulations à des surfaces mesurées (Tableau 2.1) obtenues suivant une durée de pulsation de 650 ns et une fréquence de 4 kHz. Les surfaces initiales sont obtenues suivant des procédés différents, comme le polissage par abrasion ou le fraisage. La simulation permet de se focaliser sur la prédiction d'une surface polie par laser et non uniquement d'une ligne. Les valeurs prédites sont bien corrélées aux valeurs simulées avec des écarts variant de 10 à 12 % (Figure 2.28). Ces écarts peuvent être causés par des localisations différentes des mesures avant et après polissage laser.

Matériau	S_a initial mesuré [nm]	S_a final mesuré [nm]	S_a final simulé [nm]
Nickel	191,3	146,8	130,6
Ti6Al4V	181,2	82,2	89,9
Al-6061-T6	191,7	130,8	115

Tableau 2.1 : valeurs mesurées et prédites par le modèle de simulation

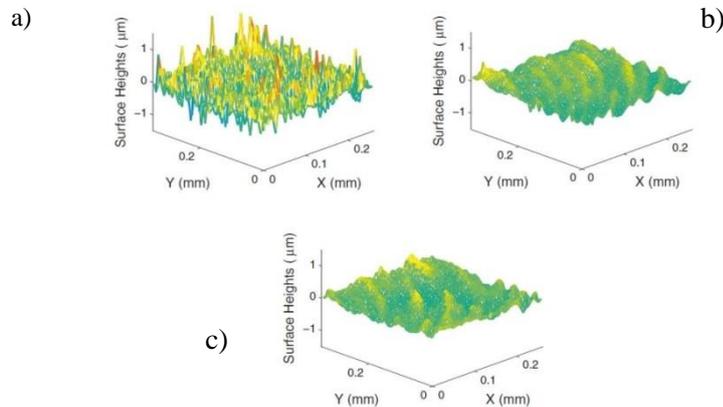


Figure 2.28: topographie initiale (a), mesurée (b), prédite (c)

L'étude évoque un modèle prédictif relativement rapide, mais aucun temps de calcul n'est mentionné. De plus, les simulations présentées portent sur des surfaces relativement restreintes. Enfin, le modèle est plus efficace pour des durées de pulsations inférieures à 650 ns.

Suivant le même calcul de fréquence critique, Ukar et al. [Ukar2012.1] proposent une simulation du procédé de macro-polissage, basée sur un modèle thermique par conduction.

Les auteurs utilisent la méthode des différences finies afin de résoudre l'équation thermique, et en vue de déterminer le champ de température pour chaque instant et selon chaque nœud du

maillage [Ukar2010.b]. Le modèle thermique obtenu est en trois dimensions et est applicable pour un laser CO₂ de type Gaussien et HDPL de type top-hat. Le modèle thermique tient compte des effets de changement de phase du matériau et permet de déterminer la chaleur transmise.

Les auteurs confrontent les résultats simulés aux résultats expérimentaux (Figure 2.29). La surface mesurée est obtenue pour une puissance de 582 W (sortie mesurée), une avance de 1920 (mm/min), pour une densité d'énergie de 1137 J/cm².

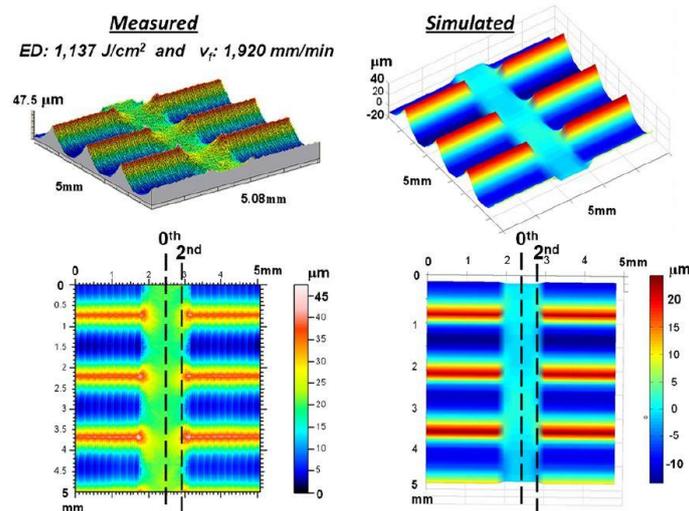


Figure 2.29: ligne mesurée (gauche) polie par laser et ligne simulée (droite)

La rugosité R_a mesurée est de 0,78 μm pour un R_a simulé de 0,85 μm avec une erreur de simulation d'environ 10-15 %. Le modèle de simulation présenté permet de simuler une ligne polie par laser selon une erreur acceptable. Cependant, seules des lignes polies sont simulées et non des surfaces complètes. Aucun temps de calcul n'est mentionné. La problématique du temps de calcul peut être un frein quant à l'utilisation industrielle du modèle.

2.3.4.1 Conclusion

La simulation multi-physique est une alternative à la modélisation expérimentale dans une optique d'optimisation. Toutefois, les simulations proposées permettent une bonne prédiction de la topographie finale et cela en trois dimensions, ce qui renseigne sur des paramètres de topographies autres que la rugosité. La contrainte principale de cette approche est le temps de calculs, souvent prohibitif industriellement parlant. De plus, les études proposées se limitent au polissage de plans ou encore excluent le taux de recouvrement dans le cas du macro-polissage.

2.3.5 Génération de trajectoires

M. Vadali et al. [Vadali2013] présentent un modèle théorique de génération de trajectoires adaptées au micro-polissage de surfaces en alliage de titane.

Dans un premier temps, les auteurs mentionnent les inconvénients d'une stratégie classique, de type ZIG ZIG. Mise à part la création de bourrelets (Figure 2.30) résultant du régime thermo-capillaire, ce type de stratégie comporte d'autres problématiques. Lors du balayage de la surface, le faisceau laser parcourt plusieurs fois la zone à traiter, à cause du recouvrement de passe et du recouvrement suivant l'avance (pulsations). Ce phénomène peut engendrer une surchauffe et donc une déformation de la surface finale. En outre, ce type de stratégie n'est pas

sélectif, c'est-à-dire qu'il est possible que le faisceau traite des zones lisses. Lors de la stratégie ZIG ZAG, il est possible que les changements abrupts de direction causent des problématiques de positionnement du laser, dues à l'accélération dans les angles. De plus, les auteurs mentionnent une texturation finale directionnelle impactant sur le comportement tribologique.

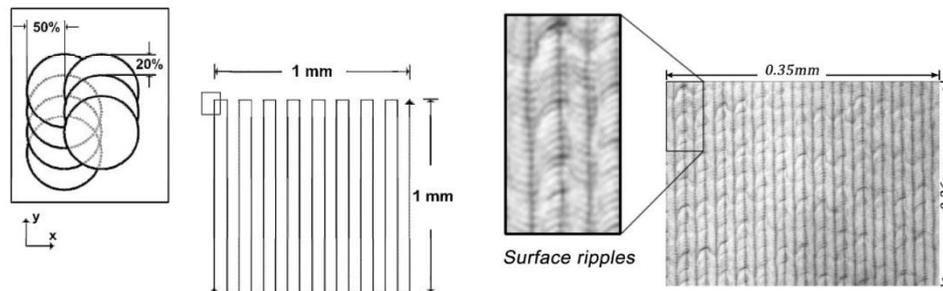


Figure 2.30: stratégie zig zag et topographie induite par ce type de stratégie

Pour mettre en place un générateur de trajectoires optimal permettant de réaliser des trajectoires irrégulières, lissées et adaptées à la surface initiale, les auteurs utilisent la méthode des champs potentiels artificiels. Utilisée pour la planification des mouvements des robots et plus particulièrement sur l'évitement des obstacles, cette méthode permet de déterminer des zones attractives (zones à polir) et des zones répulsives (zones à ne pas traiter).

L'algorithme permet aussi une optimisation des temps de cycles, en diminuant le temps passé dans les zones à éviter. Les auteurs présentent une simulation de trajectoire adaptée à une surface de 50 μm de profondeur pour un diamètre de 1 mm (Figure 2.31).

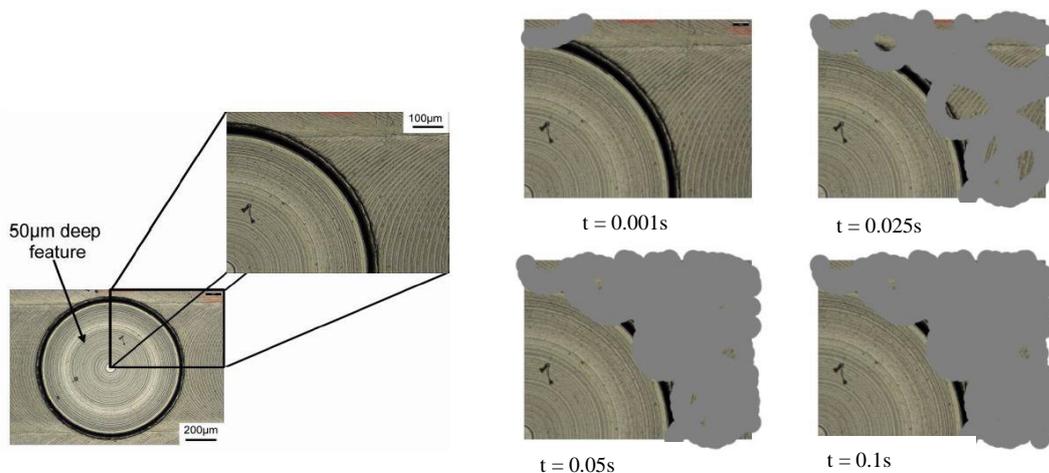


Figure 2.31: simulation de trajectoires adaptées selon des temps de processus différents

L'algorithme proposé est applicable à n'importe quelle topographie initiale. Cependant, une validation expérimentale est nécessaire afin de tester la faisabilité du générateur.

2.3.6 Conclusion générale sur la modélisation et la simulation

La modélisation expérimentale semble être adaptée au contexte industriel contrairement aux simulations multi-physiques, contraignantes en termes de temps de calculs. Cependant, il demeure nécessaire d'intégrer certains paramètres influents dans la méthodologie expérimentale, comme la topographie initiale, certaines caractéristiques topologiques de la pièce, ou encore le taux de recouvrement de passe.

2.4 Analyse du matériau après polissage laser

Le polissage laser engendre une forte transmission thermique pouvant avoir un impact sur le matériau et donc modifier la tenue mécanique de la pièce. Afin d'analyser le comportement mécanique de la surface après polissage laser, R. Avilés et al. [Avilés2011] étudient la tenue en fatigue de la surface après traitement laser continu sur de l'acier AISI 1045 sans gaz de protection.

Après polissage laser, l'extrémité de la surface comporte des oxydes de fer, des micro-fissures ainsi que des inclusions (Figure 2.32). Ces défauts sont engendrés par les phénomènes de fonte et de re-solidification. Ils ont tendance à dégrader la tenue en fatigue. Ces résultats montrent qu'il est nécessaire d'inclure le paramètre de tenue en fatigue comme critère de qualité. Les auteurs montrent aussi que l'évolution du comportement en fatigue dépend de la rugosité initiale et qu'il est possible d'améliorer la résistance à un nombre de cycles de 10^6 selon un seuil de rugosité initiale R_{ath} égal à $5\mu\text{m}$.

Cette étude souligne que l'aspect mécanique des surfaces est un point important, qui est peu abordé. Mais, l'étude ne prend pas en considération le taux de recouvrement de passe, qui a sûrement un rôle déterminant quant à l'impact thermique et donc sur la tenue en fatigue.

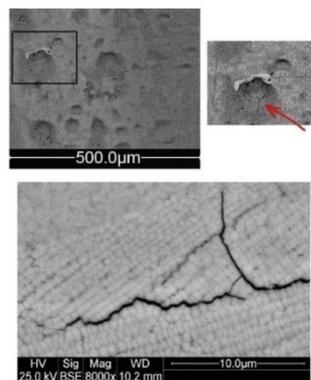


Figure 2.32: microfissures après polissage laser

Perry et al. [Perry2009b] remarquent eux aussi l'apparition de microfissures sur une surface usinée en Ti6Al4V après micro-polissage laser sans utilisation de gaz inerte de type argon (Figure 2.33). Il est montré que l'utilisation de gaz comme l'argon lors du polissage laser a tendance à éliminer les microfissures en surface.

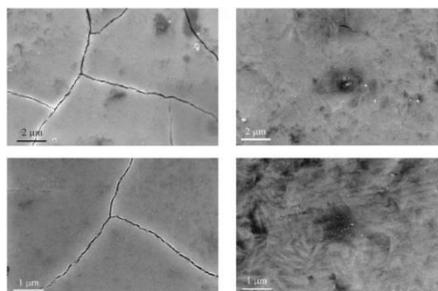


Figure 2.33: surface polie sans protection (gauche) et avec argon (droite)

2.5 Optimisation suivant une approche multi-process

Dans un contexte d'optimisation globale de fabrication, il est nécessaire d'intégrer le procédé primaire. Dans cette optique, A. Lamikiz et al. [Lamikiz2006] étudient le macro-polissage suivant différentes topographies initiales obtenues à travers des pas d'usinages différents (a_e). La topographie initiale usinée est caractérisée par la hauteur de crête d'usinage (h_c) [Lin1996] qui est dépendante du pas d'usinage et du rayon de la fraise hémisphérique (R) dans le cas d'usinage de formes complexes (Eq.2.7) (Figure 2.34).

$$h_c = a_e^2/8R \quad \text{Eq.2.7}$$

Avec h_c [mm], a_e [mm] et R [mm]

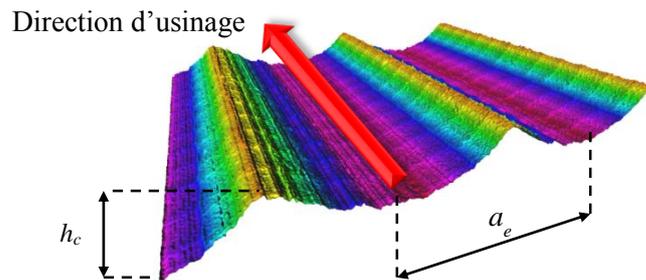


Figure 2.34: caractérisation d'une surface usinée obtenue suivant une fraise hémisphérique dans le cas d'usinage de formes complexes

Il est mis en évidence que l'augmentation de la rugosité initiale améliore l'efficacité du procédé de polissage laser. Cependant, dans le domaine expérimental étudié, la rugosité initiale a peu d'impact sur le résultat final (Tableau 2.2). En effet, le pas d'usinage varie entre 0,1 et 0,6 mm, divisant ainsi les temps de cycles par 6. Le gain apporté par le polissage laser entre un pas d'usinage de 0,6 et un pas de 0,1 est de 0,046 μm , ce qui est relativement faible. Il est donc important de prendre en considération le procédé primaire, en vue de garantir une optimisation qualitative et productive.

Pas d'usinage [mm]	Puissance [W]	Offset [mm]	R_a initial [μm]	R_a final [μm]
0,1	800	22	0,756	0,356
0,2	1000	27	0,932	0,372
0,4	1500	37	1,4412	0,4829
0,6	800	22	1,7065	0,402

Tableau 2.2: résultats des expérimentations et réglages des paramètres d'entrée

Dans une autre étude [Marinescu2007], la topographie initiale est intégrée à l'optimisation par une variation du pas d'usinage. Ainsi, différents paramètres laser, comme la puissance, l'avance et l'offset sont appliqués aux différentes topographies initiales. Les expérimentations permettent d'obtenir une rugosité après polissage laser de 0,356 μm pour une rugosité initiale de 0,75 μm . Cependant, l'étude se focalise sur le polissage de ligne ce qui a tendance à limiter l'application du procédé de polissage laser dans le cas du traitement de surfaces complètes.

A. Gisario et al. [Gisario2011] étudient trois topographies initiales fraisées selon des avances différentes donnant trois rugosités initiales. La trajectoire du laser est de type hélicoïdal afin de garantir un recouvrement de passe sur l'échantillon cylindrique. La distance focale demeure

constante durant les essais, et les variables opératoires sont la puissance laser, la vitesse de rotation et la vitesse d'avance.

La texture de la topographie initiale est périodique, et l'augmentation de l'avance augmente progressivement la rugosité initiale. L'augmentation de l'avance influe aussi sur d'autres paramètres de topographies, tels que le R_{sm} , le R_{Aq} , le R_{sk} et le R_{ku} .

L'augmentation de la puissance et de l'avance donnent un résultat plus uniforme. C'est pourquoi le choix de la puissance ne doit pas amener à négliger le choix de l'avance. Comparée à la topographie initiale, la surface finale est plus chaotique et la période initiale a totalement disparue (Figure 2.35).

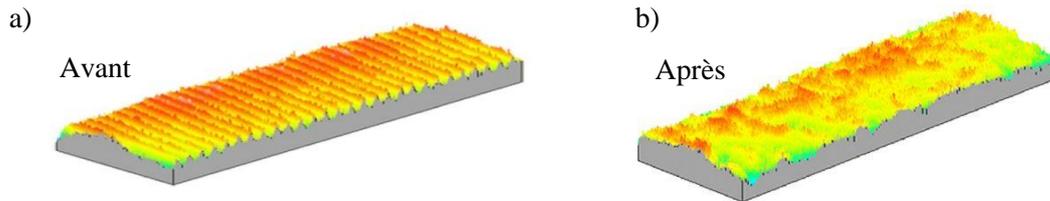


Figure 2.35: topographies avant (a) et après polissage laser (b)

Enfin, une modélisation par les surfaces de réponses est présentée (Figure 2.36) en vue de prédire le résultat final.

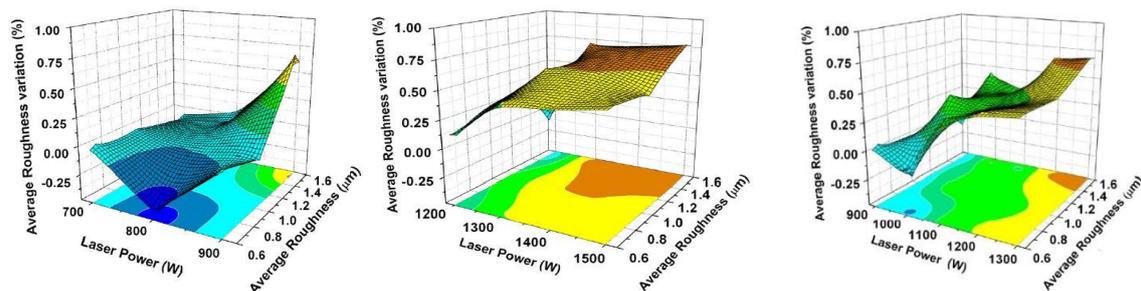


Figure 2.36: modélisation du procédé de polissage laser par la méthode des surfaces de réponses

Cette étude tient compte des facteurs les plus influents, à savoir les paramètres opératoires du laser, le recouvrement de passe et la topographie initiale. Des paramètres de topographies pertinents sont utilisés en vue d'analyser le lissage de la surface, ce qui a tendance à améliorer la compréhension du phénomène de polissage. Les modèles prédictifs proposés ne prennent toutefois pas en compte la topographie initiale et le taux de recouvrement.

2.5.1 Conclusion

La topographie initiale influence le résultat final et joue un rôle dans l'optimisation globale. Certaines études intègrent ce paramètre dans l'optimisation, ou proposent une quantification de son impact. Cependant, aucune étude ne propose vraiment une optimisation globale, mise en avant par l'intégration des paramètres opératoires, du taux de recouvrement de passe et de la topographie initiale dans un même modèle. Bien que la capacité de fonte du macro-polissage soit forte, aucune étude ne propose une maximisation de la hauteur de crête initiale pour déterminer les limites de faisabilité du procédé.

2.6 Polissage laser de pièces obtenues par fabrication directe

Concernant le polissage laser de pièces obtenues par fabrication directe, Lamikiz et al. [Lamikiz2006] se focalisent sur le macro-polissage de topographies obtenues par lit de poudres SLS (Selective Laser Sintering). Le matériau est un alliage composé de poudres d'inox et de bronze. La rugosité initiale est de $7,51 \mu\text{m}$ pour une rugosité après polissage laser de $1,49 \mu\text{m}$ (Figure 2.37). Une seule topographie initiale est étudiée pour cette technologie de fabrication additive, et les tests sont réalisés sur une ligne polie par laser et non sur une surface. De plus, les auteurs ne proposent pas de modèle de prédiction, ce qui limite l'industrialisation du procédé de polissage laser.

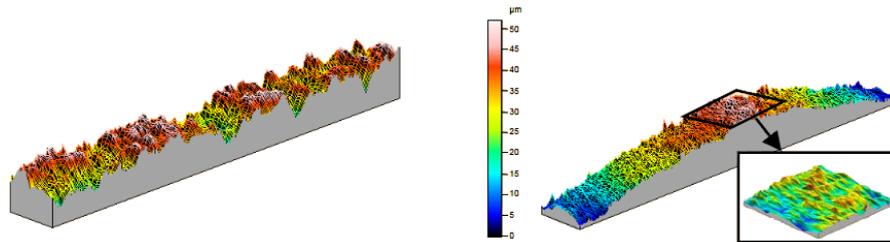


Figure 2.37: topographie initiale obtenue par SLS (gauche) et polie par laser (droite)

Après une détermination des paramètres optimaux sur une ligne polie, ces mêmes auteurs [Lamikiz2007] introduisent le paramètre de recouvrement de passe sur une surface obtenue par fabrication directe (SLS) (Figure 2.38). Ainsi, les paramètres de recouvrement optimaux sont déterminés pour des plages se situant entre 15 et 30%, amenant à un pourcentage de réduction de rugosité de 68,2 %. Les rugosités, après polissage, se situent entre $2,5 \mu\text{m}$ à moins de $1 \mu\text{m}$. La topographie obtenue après polissage laser présente une texture isotrope composée d'une rugosité similaire selon toutes les directions. L'isotropie d'une surface améliore la résistance en fatigue de la pièce mécanique. Aussi, aucune déviation de la forme de la pièce après polissage laser de la surface n'est remarquée, dans le cas d'une pièce de section épaisse.

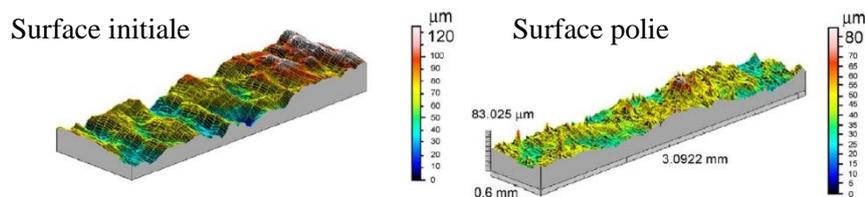


Figure 2.38: topographie initiale obtenue par fabrication directe (SLS) (gauche) et topographie polie par laser (droite) selon un taux de recouvrement de 25%

J.A. Ramos et al. [Ramos2002] étudient aussi le polissage laser de pièces obtenues par fabrication additive par technologie SLS sur un matériau inox-bronze. Les auteurs présentent des résultats préliminaires en vue de déterminer les paramètres optimaux. Le laser utilisé est de type CO_2 en mode continu. La surface finale optimale atteint un R_a de $0,8 \mu\text{m}$ pour une rugosité initiale de $2,38 \mu\text{m}$. Pour une rugosité initiale de $9 \mu\text{m}$ la rugosité finale atteint $2,4 \mu\text{m}$. Les auteurs remarquent des paramètres opératoires optimaux différents selon la rugosité initiale.

M. Rombouts et all. [Rombouts 2013] étudient le polissage laser de pièces obtenues par fabrication directe suivant la technologie par projection de poudres. Le matériau est de l'acier inox de type AISI 316L et l'épaisseur des échantillons est de 8 mm. La direction de polissage laser est perpendiculaire au sens de dépôt. Les paramètres de rugosité sont obtenus suivant un filtre de coupure de 2 mm, qui n'est pas normalisé. L'étude met en avant l'impact des

paramètres opératoires sur le paramètre R_t évalué perpendiculairement (Axe y) et parallèlement (Axe x) au sens de dépôt de matière de la surface initiale (Figure 2.39).

Dans un second temps, l'étude met en avant la capacité du polissage laser à éliminer l'ondulation de la topographie initiale obtenue suivant différentes inclinaisons de fabrication (75° , 60° et 45°).

Après polissage, un R_a final de $1,5 \mu\text{m}$ est obtenu, ainsi qu'une réduction significative de la rugosité pour l'ensemble des inclinaisons de surface initiale (Figure 2.40). Cependant, l'analyse visuelle des images montre la présence de la topographie initiale après polissage laser.

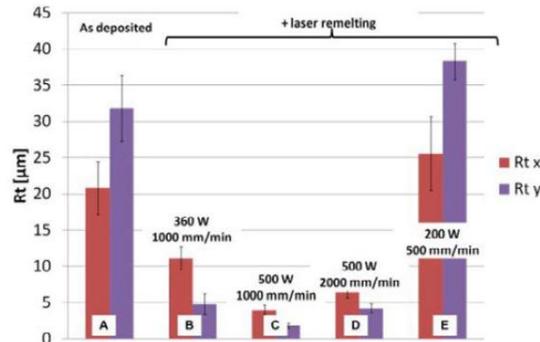


Figure 2.39: évolution du paramètre R_t suivant les paramètres de polissage laser

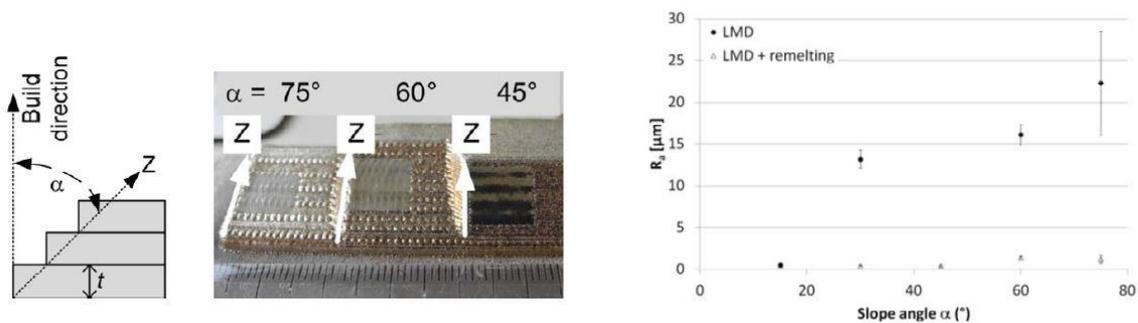


Figure 2.40: rugosités finales en fonction de l'angle (α) de fabrication de la topographie initiale

En vue d'optimiser une surface complète, la première étape consiste à déterminer les paramètres optimaux sur une ligne polie avant d'intégrer le paramètre de recouvrement. Suivant cette méthodologie, A. Lamikiz et al. [Lamikiz2007] mettent en place un plan d'expérience suivant les trois paramètres opératoires du laser, qui sont, la puissance, l'avance et l'offset appliqués à une surface initiale obtenue par SLS. La matrice expérimentale permet par la suite de modéliser le système par une régression quadratique entre les données expérimentales, afin de déterminer le point optimal à partir d'une surface de réponse (Figure 2.41a).

Un pourcentage de réduction de 86,8 % est obtenu pour une rugosité initiale de $7,5 \mu\text{m}$. Le modèle de prédiction quadratique permet de prédire la rugosité finale avec une erreur maximale de 14 % (Figure 2.41b).

Le modèle statistique proposé est applicable seulement dans le cas du polissage de lignes et non de surfaces. De plus, ce modèle ne prend pas en considération la topographie initiale.

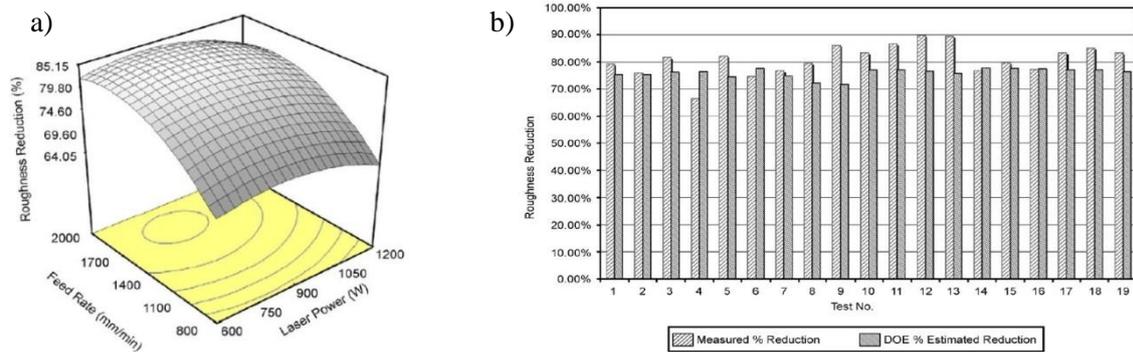


Figure 2.41: surface de réponse (a) entre la puissance laser, l'avance et la rugosité finale pour un offset égal à 0 et validation expérimentale du modèle (b)

Afin de prédire la topographie après polissage laser, Ramos et al. [Ramos2001] couplent un modèle thermique à une modélisation analytique de la topographie initiale (Figure 2.42). Suite aux mesures réalisées par microscopie, la topographie initiale obtenue par frittage de poudres (SLS) est composée de particules de poudres sphériques de différentes tailles et liées entre elles. Ainsi, après polissage laser, les hauteurs des particules sont réduites et la rugosité est atténuée.

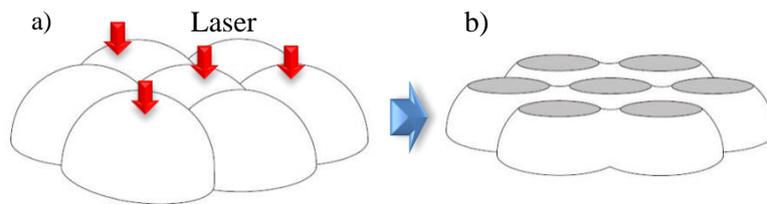


Figure 2.42: modélisation analytique de la topographie avant (a) et après polissage laser (b)

La rugosité (Eq.2.8) est donc calculée à partir du modèle géométrique des sphères (Figure 2.43). Le modèle thermique permet de déterminer la diminution d'amplitude quantifiée par l'évolution de la rugosité.

$$R_a \approx \frac{\sum_{i=1}^N (R_i - Z_m) - Z_f}{N} \quad \text{Eq.2.8}$$

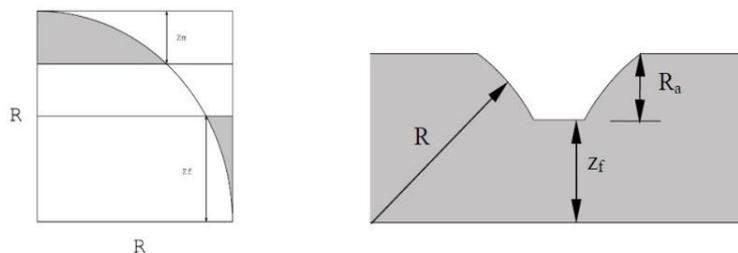


Figure 2.43: principe de détermination du paramètre R_a

Afin de valider le modèle analytique, les auteurs confrontent les données expérimentales et prédites (Figure 2.44). Le modèle est capable de prédire le R_a selon une erreur de 15 % pour une plage d'avance située entre 1,1 et 1,9 mm/s et une puissance de 320 W.

Toutefois, le taux de recouvrement de passe n'est pas pris en compte lors du polissage laser, ce qui donne un modèle qui n'est applicable qu'à une ligne polie par laser. La chaleur apportée

par le taux de recouvrement de passe qui influence pourtant fortement la profondeur de fonte et donc le lissage final, est totalement mise à l'écart.

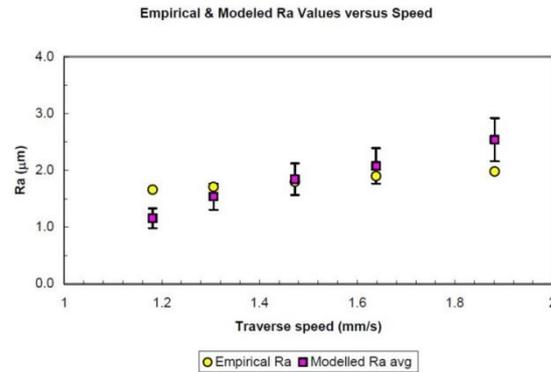


Figure 2.44: validation expérimentale du modèle analytique

2.6.1 Conclusion

La majorité des études portant sur le polissage laser de pièces obtenues par fabrication additive se focalisent sur la technologie par lit de poudre, et une seule étude analyse le procédé primaire par projection de poudre.

Concernant le polissage laser de surfaces obtenues par lit de poudres, de faibles valeurs d'Overlap sont utilisées, ce qui limite la connaissance concernant le domaine de faisabilité. Le modèle analytique, quant à lui, ne tient pas compte de ce paramètre.

Dans le cas de la technologie par projection de poudre, aucun modèle n'est mis en place, seule une étude de faisabilité expérimentale est proposée. Expérimentalement, les paramètres étudiés sont la puissance, l'avance et la direction de fabrication de la surface initiale qui a un impact sur la rugosité. Les auteurs étudient brièvement l'impact du polissage laser sur l'ondulation de la surface mais ne parviennent pas à l'éliminer totalement.

2.7 Polissage laser de formes complexes

Suivant une approche de faisabilité, J. Lambarri et al. [Lambarri2013] déterminent les paramètres opératoires permettant de minimiser la rugosité finale d'une pale en superalliage de nickel. Deux superalliage de nickel sont étudiés (alliages 1 et 2). Concernant l'alliage 1, un pourcentage de réduction de R_a de 81 % est obtenu pour une puissance de 150 W, une avance de 4 m/min, pour un R_a final de 0,95 (Figure 2.45) et un R_a initial de 4,6 µm.

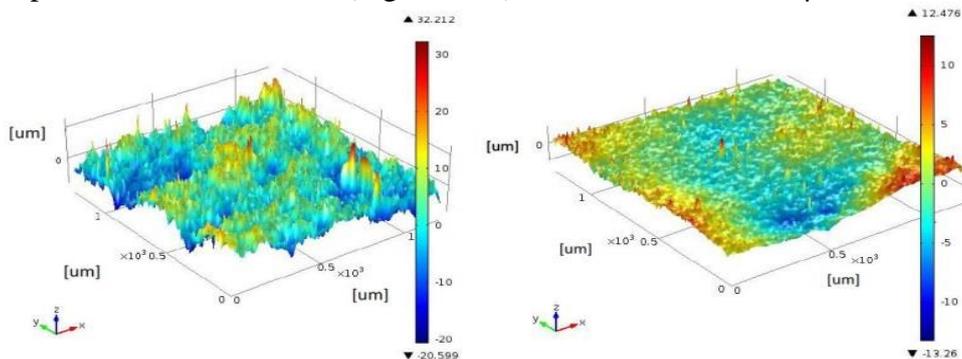


Figure 2.45: surface initiale (gauche) est surface polie par laser (droite)

Avec un R_a initial de d'environ $3\ \mu\text{m}$ pour l'alliage 2, une rugosité finale de $0,58\ \mu\text{m}$ est atteinte. La surface de forme complexe polie par laser est présentée et comporte visuellement un résultat acceptable (Figure 2.46). A noter : les défauts indiqués par les flèches étaient présents avant polissage laser.



Figure 2.46: pale de turbine polie par laser

Les résultats présentés sont satisfaisants. Les auteurs n'utilisent toutefois qu'un seul taux de recouvrement, et de très faibles variations de la rugosité initiale, limitant une fois de plus l'optimisation du procédé de polissage laser.

2.8 Synthèse de l'état de l'art et verrous scientifiques

D'un point de vue global et industriel, le traitement de surface par laser peut se décomposer en diverses applications telles que le polissage, l'ablation ou encore la texturation.

Le procédé de polissage laser se divise en deux variantes majeures, qui sont le macro et le micro-polissage. Globalement, ce procédé de finition laser s'intègre pleinement au sein de la chaîne de fabrication. Ainsi, il est possible d'améliorer la qualité des surfaces ébauchées à travers un laser continu et d'optimiser d'avantage la microrugosité grâce au laser pulsé.

Certaines études analysent le polissage laser de matériaux durs et donc difficilement usinables, ce qui constitue un avantage vis-à-vis des procédés d'enlèvement de matière qui se heurtent à des problématiques d'usure outil pour de tels matériaux.

La majorité des études se focalisent sur le micro-polissage qui permet d'obtenir de plus faibles rugosités surfaciques en comparaison de la variante de macro-polissage. Cependant, le **macro-polissage** dispose d'avantages, notamment sur la réduction du pourcentage de rugosité. Ce procédé permet de réduire significativement des états de surfaces conséquents, ce qui est approprié aux topographies obtenues par projection de poudres, ou aux surfaces usinées ébauchées, contrairement au micro-polissage qui est adapté pour de faibles volumes de fonte.

Le processus de macro-polissage fait intervenir différents groupes de paramètres plus ou moins influençant sur le résultat final. De par un nombre important de facteurs influents, l'optimisation du procédé de polissage laser demeure complexe et fastidieuse, ce qui pousse certaines études à négliger des paramètres et donc, à limiter l'optimisation du procédé de polissage laser. Ainsi, certaines études se focalisent sur le polissage de lignes et excluent le **taux de recouvrement de passe** de l'optimisation, ce qui tend à limiter son utilisation industrielle.

Dans un **contexte global de fabrication**, peu d'études prennent en considération les caractéristiques de la pièce, que ce soit la topographie initiale ou la topologie. Concernant la **topographie initiale**, celle-ci demeure écartée des modèles, et certaines études ont tendance à

analyser des plages de variation relativement restreintes, limitant ainsi les possibilités du macro-polissage. Globalement, le procédé de polissage laser est perçu comme un procédé qui n'a pas d'impact sur la géométrie de la pièce. De ce fait, la majorité des études se focalisent sur le polissage de sections épaisses et écartent les problématiques de déformations pouvant être induites par le procédé de polissage laser. Le polissage laser de **pièces de sections minces** est donc un verrou scientifique vis-à-vis d'un des principaux avantages de la fabrication additive qui permet la fabrication de ce type de sections.

Dans le cadre du **polissage de formes complexes**, très peu de modèles prennent en considération la courbure de la pièce, qui est pourtant une caractéristique principale des pièces de formes complexes.

Majoritairement, les procédés primaires étudiés sont l'usinage, la micro-fabrication, l'électroérosion ou encore la fabrication directe par lit de poudre. Actuellement, peu d'études se focalisent sur le **polissage laser de pièces obtenues par fabrication directe par projection de poudre** (CLAD). Ce verrou scientifique a tendance à pénaliser ce procédé d'ajout matière limité par la qualité des surfaces obtenues [Gharbi2013 ; 2014].

Enfin, les études proposées limitent la **généralisation des modèles** expérimentaux du fait d'une certaine restriction du domaine. Très peu de travaux proposent une **méthodologie de polissage laser** qui soit susceptible de démocratiser ce procédé très peu connu du monde industriel.

Ainsi, les présents travaux de thèse se focaliseront sur l'étude des verrous scientifiques suivants :

- Prise en compte du taux de recouvrement de passe
- Contexte global de fabrication par la prise en compte de topographie initiale
- Polissage laser de pièces obtenues par fabrication directe
- Polissage laser de pièces de sections minces
- Polissage laser de pièces de formes complexes
- Optimisation multi-procédés

2.9 Positionnement des travaux de recherche

D'un point de vue global et selon une vision industrielle, la chaîne de fabrication se compose de divers procédés de fabrication et s'appuie sur des outils numériques.

Grâce au modèle numérique 3D de la pièce (CAO) et à travers les outils de fabrication assistée par ordinateur (FAO), il est possible de piloter la machine numérique afin d'obtenir le produit conforme au cahier des charges. Le procédé de polissage laser s'intègre au sein cette chaîne numérique et se positionne suite à l'opération de fabrication (Figure 2.47). Ainsi, à partir du modèle numérique 3D, et à travers la FAO il est possible de piloter le procédé de polissage laser en vue d'obtenir la pièce fonctionnelle.

La problématique majeure réside dans le choix des paramètres opératoires à utiliser afin de garantir le cahier des charges. Ainsi, compte tenu des verrous scientifiques déterminés dans ce chapitre, ces travaux de thèse se focalisent sur la détermination des paramètres opératoires du procédé de macro-polissage. Dans une optique de maîtrise globale des procédés, ces travaux de recherche ont pour objectif de construire des outils mathématiques et / ou méthodologiques

permettant de déterminer les paramètres opératoires du procédé de finition laser vis-à-vis de la pièce à traiter.

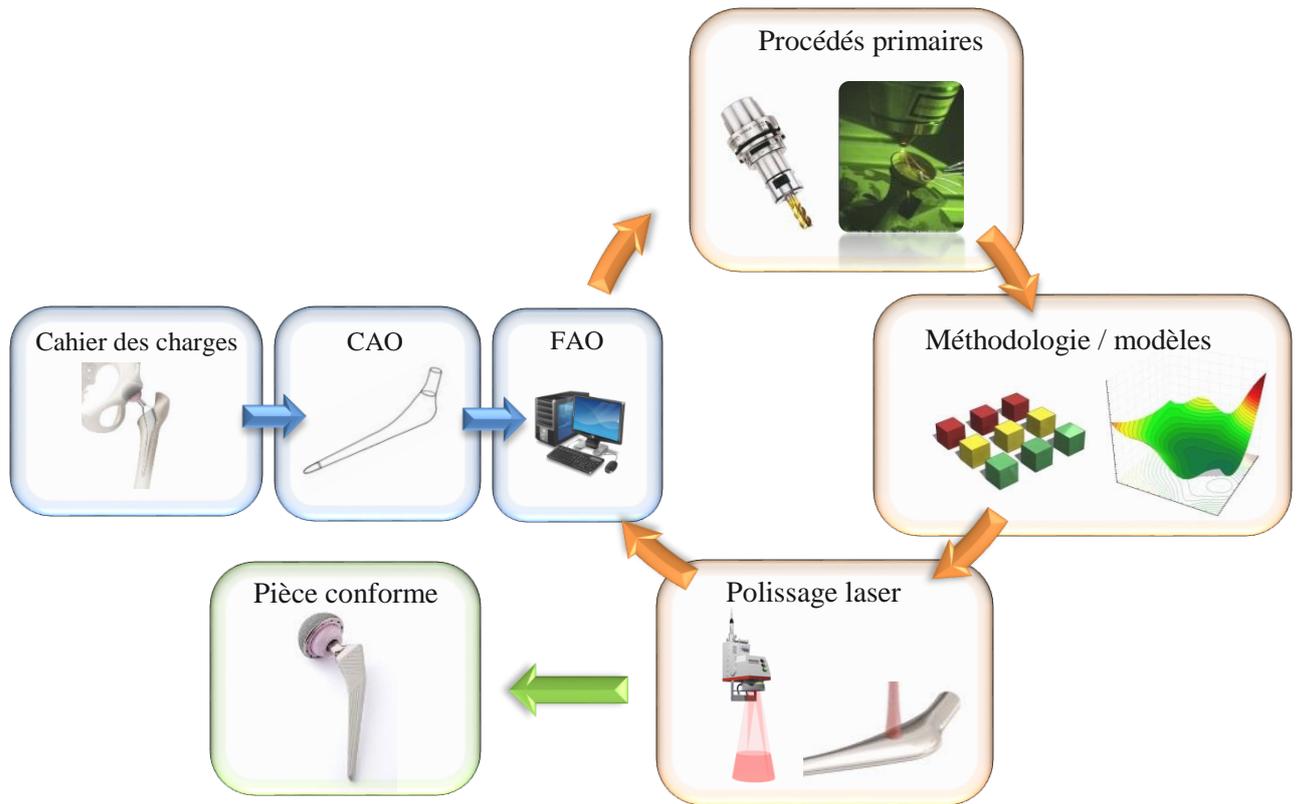


Figure 2.47: positionnement des travaux de recherche dans un contexte global de fabrication

Plus précisément, ces travaux se divisent en deux parties dépendantes du procédé primaire, qui sont l'usinage à grande vitesse et la fabrication directe par projection de poudres.

Dans le cas du procédé primaire par enlèvement de matière, ces travaux permettent de mettre en place un protocole de détermination des paramètres opératoires multi-procédés à partir d'investigations expérimentales et de modèles mathématiques (Figure 2.48).

Compte tenu des verrous scientifiques relevés précédemment, le protocole proposé prend en considération les paramètres opératoires du polissage laser, la stratégie, mais aussi la topographie initiale et cela dans le cas du traitement d'une surface complète qui fait intervenir le taux de recouvrement de passe.

Ainsi, le protocole construit permet la détermination des paramètres opératoires vis-à-vis du cahier des charges, caractérisé par la rugosité surfacique S_a [μm]. De plus, compte tenu du contexte multi-procédés, à travers des paramètres optimaux et une stratégie multi-passes, ce protocole permet de diminuer les coûts d'usinage par une minimisation des opérations d'ébauche tout en garantissant une topographie finale optimale.

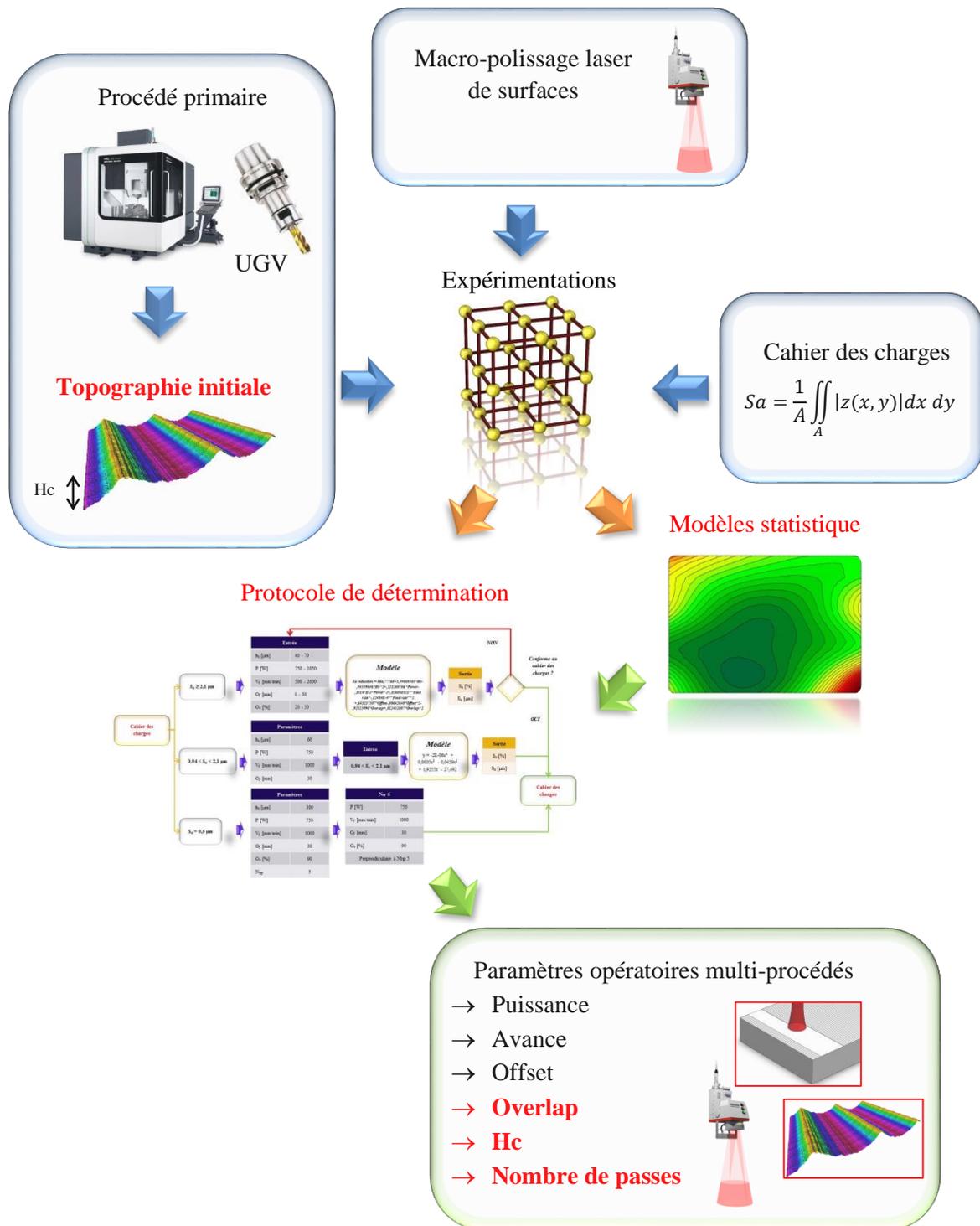


Figure 2.48: positionnement des travaux de recherche selon les verrous scientifiques, dans le cas du polissage laser de pièces usinées

L'analyse du polissage laser de pièces obtenues par projection de poudres s'articule aussi autour d'investigations expérimentales (Figure 2.49). L'objectif global de cette étude est de proposer une méthodologie de détermination des paramètres opératoires vis-à-vis d'un domaine de faisabilité contraint par diverses fonctions objectives.

Le domaine de faisabilité tient compte de plusieurs fonctions objectives, comme l'intégrité, la rugosité surfacique et la déformation géométrique. Les paramètres opératoires étudiés sont la

puissance, l'avance, l'Offset, le taux de recouvrement et le nombre de passes. Cette étude analyse aussi l'impact de de la topologie de la pièce à travers sa courbure et sa section.

La méthodologie s'appuie sur des modèles comportementaux des paramètres opératoires et sont efficaces au sein du domaine de faisabilité. Les modèles permettent de faire la relation entre la rugosité surfacique et les paramètres opératoires, en vue de garantir le respect du cahier des charges lors de l'opération de polissage laser. La méthodologie permet d'élargir la généralisation des modèles, ce qui augmente le nombre de solutions quant au choix des valeurs opératoires.

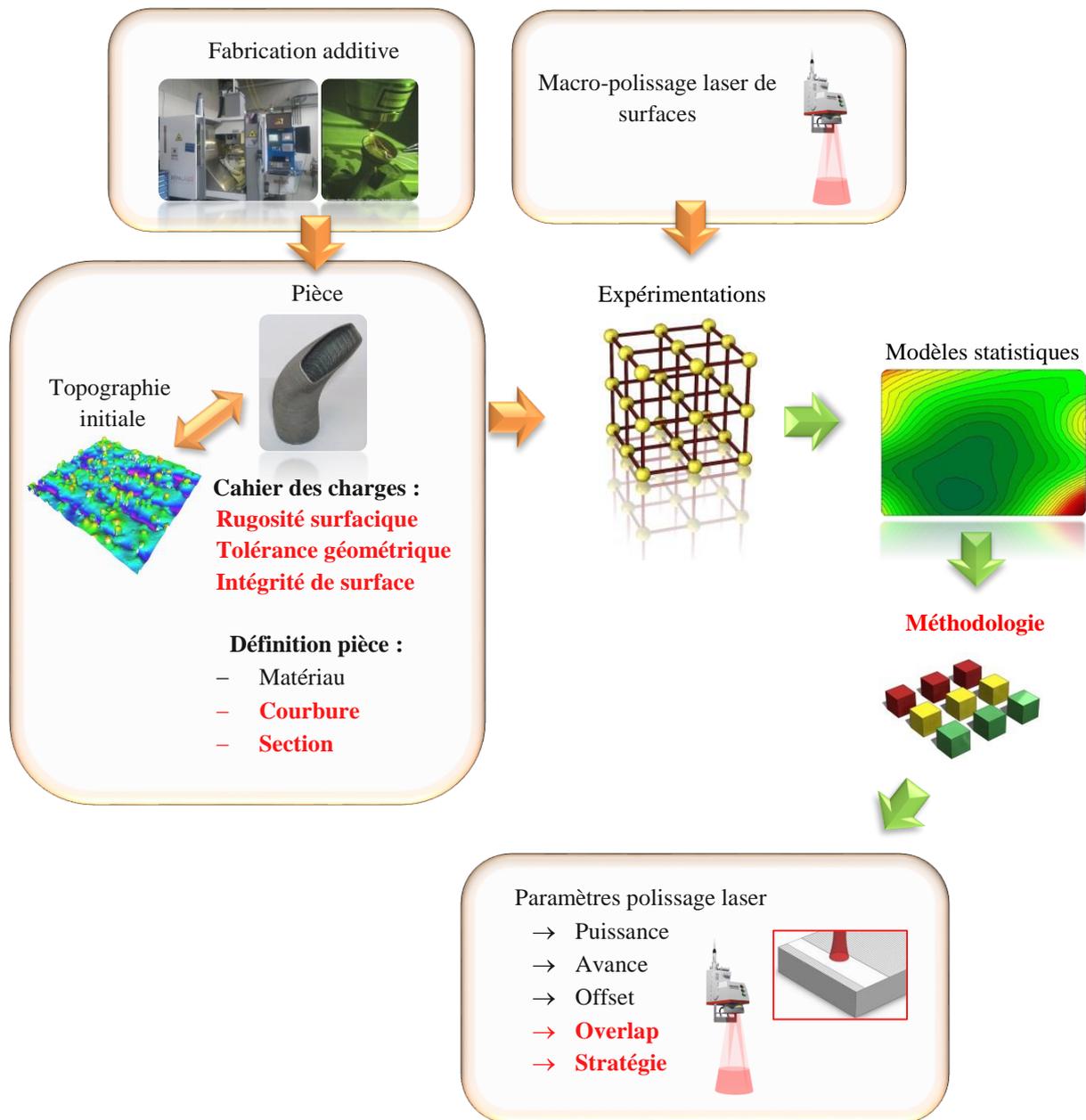


Figure 2.49: positionnement des travaux de recherches selon les verrous scientifiques, dans le cas du polissage laser de pièces obtenues par fabrication directe

Chapitre 3 : polissage laser de pièces usinées

3.1	Introduction	40
3.2	Contexte et verrous scientifiques.....	40
3.3	Méthodologie d’investigation.....	41
3.4	Etude de faisabilité	42
3.4.1	Expérimentations	42
3.4.2	Matériel.....	42
3.4.3	Résultats et analyses	43
3.4.4	Conclusion	46
3.5	Etude avancée	46
3.5.1	Expérimentations	46
3.5.2	Matériel.....	48
3.5.3	Incertitudes de mesures et variabilité du procédé.....	48
3.5.4	Résultats et analyses	49
3.5.4.1	Incertitudes de mesures et variabilité du procédé.....	49
3.5.4.2	Expérimentations	49
3.5.5	Conclusion	52
3.6	Modélisation	52
3.6.1	Apprentissage du modèle	52
3.6.2	Généralisation du modèle.....	54
3.6.3	Validation expérimentale	55
3.6.4	Conclusion	56
3.7	Optimisation	56
3.7.1	Optimisation du taux de recouvrement de passe.....	56
3.7.2	Optimisation des temps de cycles	60
3.7.3	Optimisation multi-procédés.....	60
3.7.4	Etude technico-économique.....	61
3.7.5	Conclusion	62
3.8	Protocole de détermination des paramètres multi-procédés	62
3.9	Conclusion générale	65

3.1 Introduction

Actuellement maîtrisée et très implantée dans l'industrie, l'opération de fraisage permet la réalisation de surfaces planes, cylindriques ou complexes. Cependant, du fait à de longs temps de cycles et à l'usure des outils, les opérations de finitions nécessaires à la fonctionnalité des surfaces demeurent relativement coûteuses.

Basée sur la fonte du matériau, le polissage laser permet de traiter les matériaux de très haute dureté, ce qui n'est pas envisageable dans le cas des procédés par enlèvement de matière. Concernant les matériaux difficilement usinables, le polissage laser permet de limiter la consommation d'outils. Le cas échéant, il est pertinent de limiter les opérations d'usinage par la réalisation de rugosités initiales conséquentes, qui seront ensuite atténuées par le procédé de polissage laser. Dans ce contexte, la technologie laser serait intéressante pour tout type de surface, qu'elles soient planes, cylindriques ou complexes.

Grâce à sa variation focale, qui engendre une augmentation du diamètre de faisceau, le polissage laser permettrait d'optimiser la productivité, comparé au fraisage qui nécessite l'emploi de pas de superposition restreints, nécessaires à l'obtention de faibles rugosités.

Dans un contexte de fabrication de forme complexe, le diamètre des outils de coupe et abrasifs limite l'accessibilité des surfaces de faibles courbures. Il en est de même pour le polissage manuel, qui dispose de limitations quant à l'accessibilité. De plus, de par son positionnement final au sein de la chaîne de fabrication, l'opération de finition est une étape décisive qui constitue un risque pour l'ensemble des opérations déjà établies. En vue de limiter les risques de rebut, l'automatisation de l'opération de polissage est primordiale. Pouvant atteindre des diamètres de faisceau inférieurs au millimètre, le polissage laser est un candidat pertinent quant à l'accessibilité des surfaces de faibles courbures mais aussi en termes de maîtrise, grâce à son automatisation.

3.2 Contexte et verrous scientifiques

Les outils de conception assistée par ordinateur (CAO) ainsi que la programmation numérique des machines-outils permettent la réalisation de pièces de formes complexes pour des fonctionnalités très techniques. Pour cette raison, et compte tenu des avantages du procédé de finition par laser quant à l'accessibilité, la présente étude s'intègre dans un contexte de fabrication de pièces de formes complexes.

Au regard de l'état de l'art, peu d'études intègrent la topographie initiale dans l'optimisation du procédé de polissage laser, suivant un contexte global de fabrication de pièce. De plus, certaines études se focalisent sur le polissage laser de lignes et excluent le taux de recouvrement de passes dans l'optimisation. Enfin, peu d'études proposent un modèle qui prend en considération les principaux paramètres opératoires et la topographie initiale dans le cadre d'un traitement complet de la surface.

La présente étude se positionne dans un contexte global de fabrication, et a pour objectif de modéliser et optimiser le procédé de polissage laser vis-à-vis du procédé primaire d'usinage selon les paramètres opératoires du laser et la topographie initiale. En vue d'optimiser les temps de la chaîne de fabrication, il est aussi question d'optimiser la topographie finale à partir d'une topographie initiale de très faible qualité. Enfin, dans une optique d'utilisation industrielle un

protocole de détermination des paramètres construit à partir de modèles statistiques et d'expérimentations est proposé.

3.3 Méthodologie d'investigation

La méthodologie d'investigation s'appuie sur deux campagnes expérimentales ayant chacune des objectifs précis vis-à-vis de la maîtrise du procédé (Figure 3.1). Les premières expérimentations ont pour objectif d'appréhender le procédé selon un contexte multi-procédés, en déterminant la position du domaine de faisabilité vis-à-vis des paramètres laser et de la topographie initiale. Cette étude de faisabilité permet aussi d'approcher le domaine optimal du polissage laser en fonction du procédé primaire.

La seconde campagne expérimentale s'appuie sur les paramètres déterminés lors des essais de faisabilité. Cette étude avancée s'appuie sur une matrice expérimentale, qui intègre les paramètres de polissage laser, la topographie initiale, le taux de recouvrement de passe et la rugosité surfacique finale. Les données extraites de ces essais permettent de modéliser et optimiser le polissage laser selon un contexte multi-procédés, à travers des outils de régression statistique et la méthode des surfaces de réponses. L'ensemble des essais et des modèles seront par la suite intégrés dans un protocole utilisateur, qui a pour objectif de déterminer les paramètres opératoires à utiliser selon la contrainte du cahier des charges.

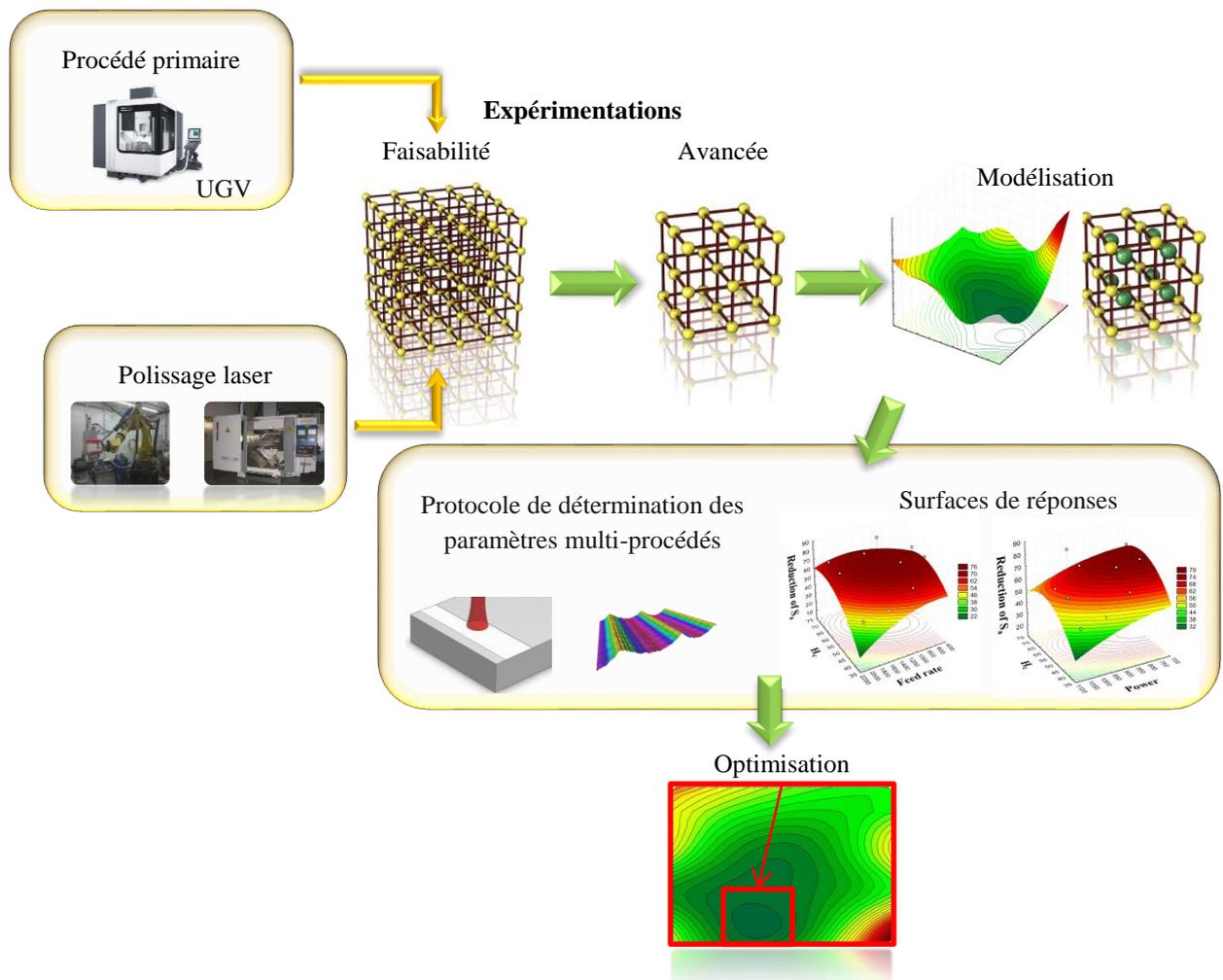


Figure 3.1: méthodologie d'investigation

3.4 Etude de faisabilité

3.4.1 Expérimentations

La première étape expérimentale consiste à déterminer le domaine de faisabilité commun au procédé primaire et au procédé de polissage laser. Cette étape permet d'ajuster les paramètres laser en fonction de la hauteur de crête d'usinage. L'étape de faisabilité se focalise uniquement sur le polissage laser de lignes, ce qui exclue le taux de recouvrement de passe.

La stratégie de polissage est perpendiculaire à la topographie initiale. Le matériau étudié est un acier inoxydable de type AISI 316L. Les échantillons ont une dimension de 100 mm x 60 mm pour une épaisseur de 30 mm. L'épaisseur des échantillons a été volontairement surdimensionnée afin d'éviter toute déformation durant le processus de polissage laser. Les lignes polies sont protégées par un apport d'argon en vue d'éviter l'oxydation du matériau.

Afin de déterminer les bornes de faisabilité du procédé de polissage laser en fonction du procédé d'usinage, des valeurs extrêmes de hauteur de crête ont été employées (Tableau 3.1).

Les topographies initiales sont obtenues avec des fraises hémisphériques de diamètre 8 et 12 mm, comme dans un contexte d'ébauche de pièce de forme complexe donnant des hauteurs de crêtes respectives de 50 et 150 μm . Les valeurs de puissance, d'avance et d'offset se basent sur les études bibliographiques [Ukar2009, Ukar2010a].

<i>Facteurs</i>	<i>Niveaux</i>
Hauteur de crête [μm]	50 ; 150
Puissance [W]	600 ; 950 ; 1300
Avance [mm/min]	1500
Offset [mm]	30

Tableau 3.1: paramètres opératoires étudiés et valeurs expérimentales associées

3.4.2 Matériel

Le procédé de polissage est basé sur une architecture anthropomorphe 6 axes, avec une tête laser de type RLSK positionnée en bout (Figure 3.2). Le laser est un laser YAG, continu, d'une puissance de 12 kW maximum et d'une longueur d'onde de 1030 nm. La tête RLSK permet un mouvement du laser indépendamment des mouvements du robot.

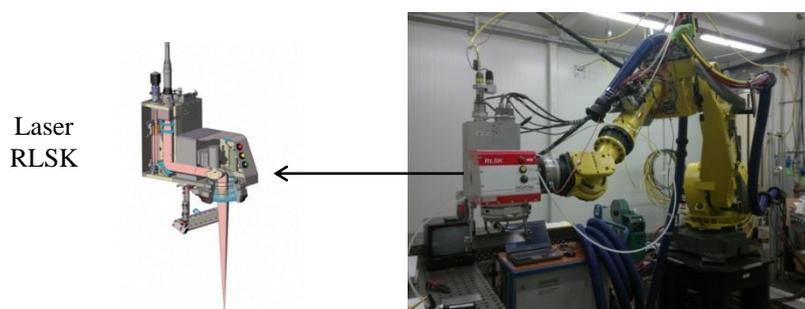


Figure 3.2: matériel utilisé lors des essais de polissage laser

Les lignes polies par laser sont mesurées à l'aide d'un microscope à variation focale de type ALICONA *infinite focus* (Figure 3.3). La méthode de mesure à variation focale est une méthode de mesure sans contact, permettant de mesurer les topographies des surfaces à travers la réflexion d'une lumière blanche suivant un déplacement vertical. L'appareil est composé de différents objectifs, comportant chacun une résolution verticale et latérale. La lumière blanche parcourt le chemin optique et est focalisée sur l'échantillon à mesurer par l'intermédiaire de

l'objectif. En fonction de la topographie à contrôler, la lumière est réfléchié différemment. A travers le logiciel de traitement, cette technologie permet une représentation précise des surfaces en trois dimensions et ainsi de calculer les paramètres d'état de surface.

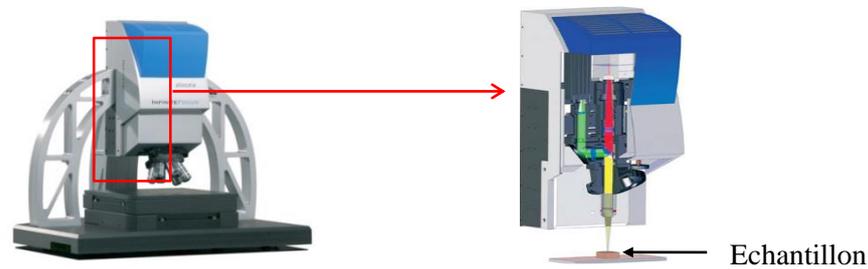


Figure 2.3: principe du microscope à variation focale

3.4.3 Résultats et analyses

Suite aux expérimentations, suivant un h_c de 150 μm (Figure 3.4a) et une puissance de 600 W, le phénomène de lissage demeure insuffisant (Figure 3.4b). Il en est de même pour une puissance plus élevée de 1300 W (Figure 3.4c) pour laquelle le laser a tendance à dégrader le lissage suivant la direction parallèle à h_c (Axe y) par un effet d'ondulation.

Cependant, malgré une faible efficacité de lissage, le polissage laser a un impact différent selon l'échelle d'observation. Dans le cas d'une hauteur de crête trop importante, le procédé ne parvient pas à atténuer l'ondulation. En revanche, la rugosité est réduite par la chaleur du laser. Ainsi, le procédé de polissage laser influence l'ondulation et la rugosité de la surface.

Un meilleur lissage est obtenu avec une puissance de 950 W appliquée à une hauteur de crête de 50 μm (Figure 3.5a). Toutefois, une ondulation d'axe y est toujours présente, ce qui montre que la puissance appliquée reste excessive. Pour une puissance de 600 W et une hauteur de 50 μm , le lissage est proche de l'optimum (Figure 3.5b). En effet, aucune ondulation n'est générée suivant l'axe y et la topographie 3D met bien en avant le phénomène de lissage engendré par une atténuation de l'amplitude des pics et une diminution du volume des creux de la surface. Un ajustement de la puissance et de la hauteur de crête semble cependant pertinent pour l'optimisation du processus de lissage.

En effet, une augmentation de la puissance à une valeur de 750 W permet d'obtenir un meilleur lissage (Figure 3.6) et cela pour une hauteur de crête de 60 μm . Le profil de topographie après polissage est plus chaotique que le profil initial. Les amplitudes de surfaces sont atténuées et la longueur d'onde est irrégulière, ce qui signifie que la topographie initiale est bien éliminée et que le procédé de polissage laser est relativement proche de l'optimum.

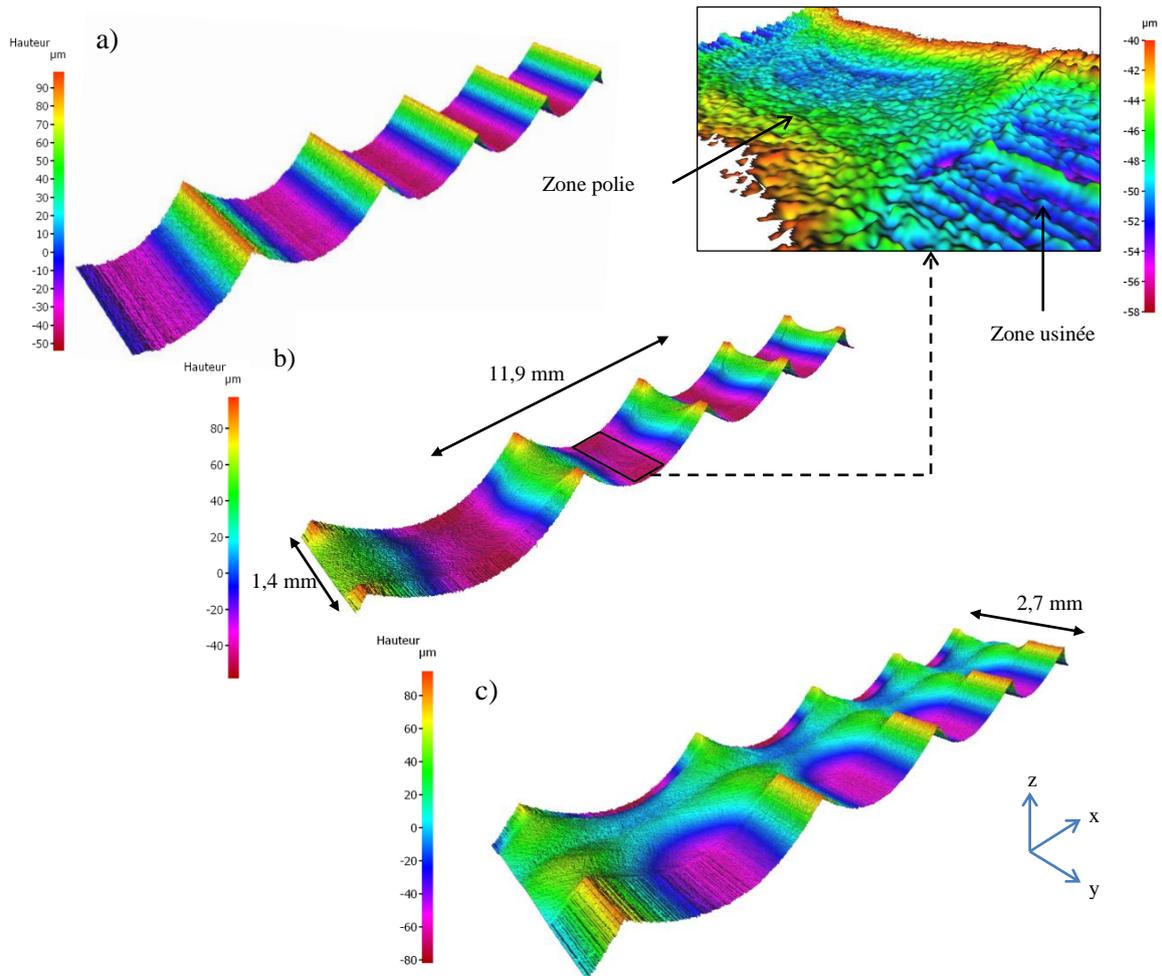


Figure 3.4: topographies initiale (a), et polies par laser suivant des puissances de 600 W (b) et 1300 W (c) pour une hauteur de crête initiale de 150 μm

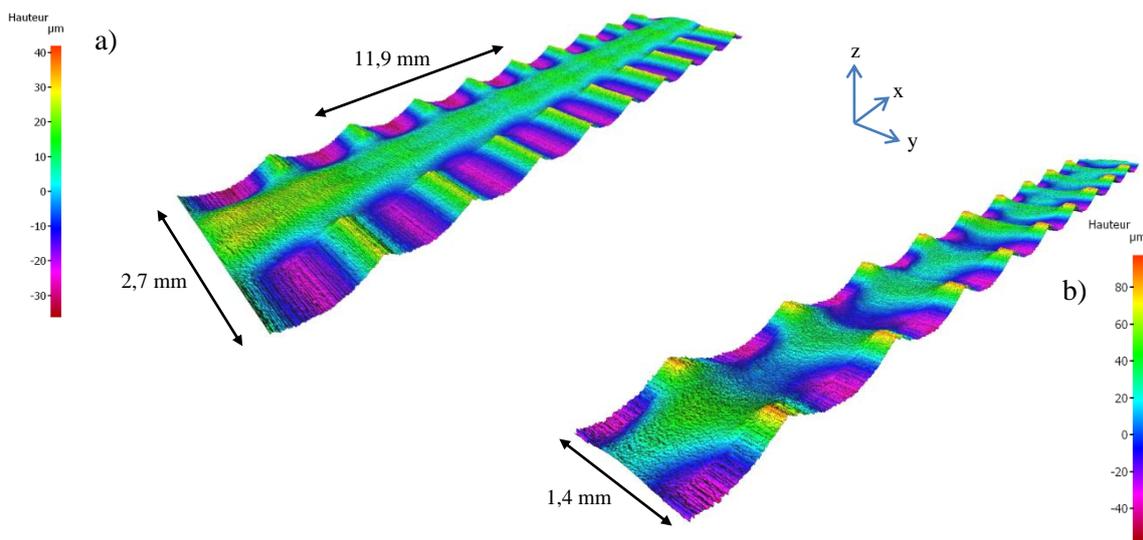


Figure 3.5: topographies polies par laser suivant des puissances de 950 W (a) et 600 W (b) pour une hauteur de crête de 50 μm

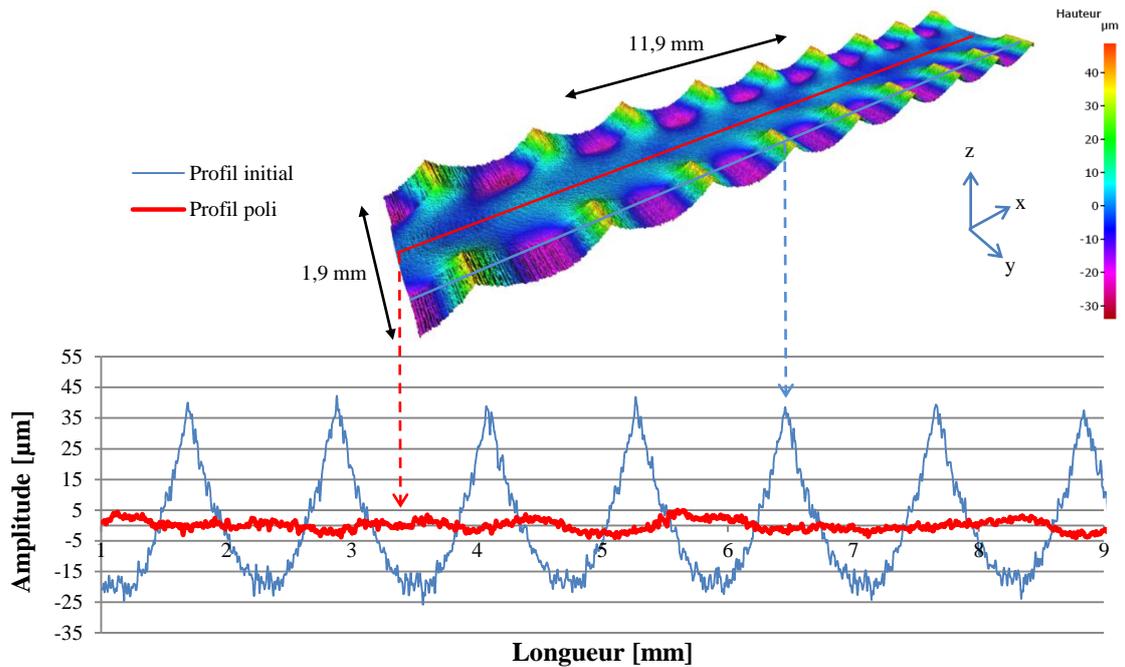


Figure 3.6: topographie polie par laser suivant une puissance de 750 W pour une hauteur de crête de 60 μm et profils associés

La topographie polie est composée de deux profils différents au centre et au bord du passage du faisceau. Au centre du passage du faisceau, le lissage est optimal, tandis que sur le bord du passage du faisceau le phénomène de lissage est moins efficace (Figure 3.7) ce qui ne permet pas d'éliminer totalement la topographie initiale. Ce phénomène est dû à la distribution de la densité d'énergie qui est de type Gaussienne pour un Offset de 30 mm. La densité d'énergie est plus prononcée au centre du faisceau et plus faible sur les bords. Ainsi, lors du polissage d'une ligne, une différence d'efficacité et donc de lissage est induite, ce qui peut avoir un impact lors du traitement d'une surface complète.

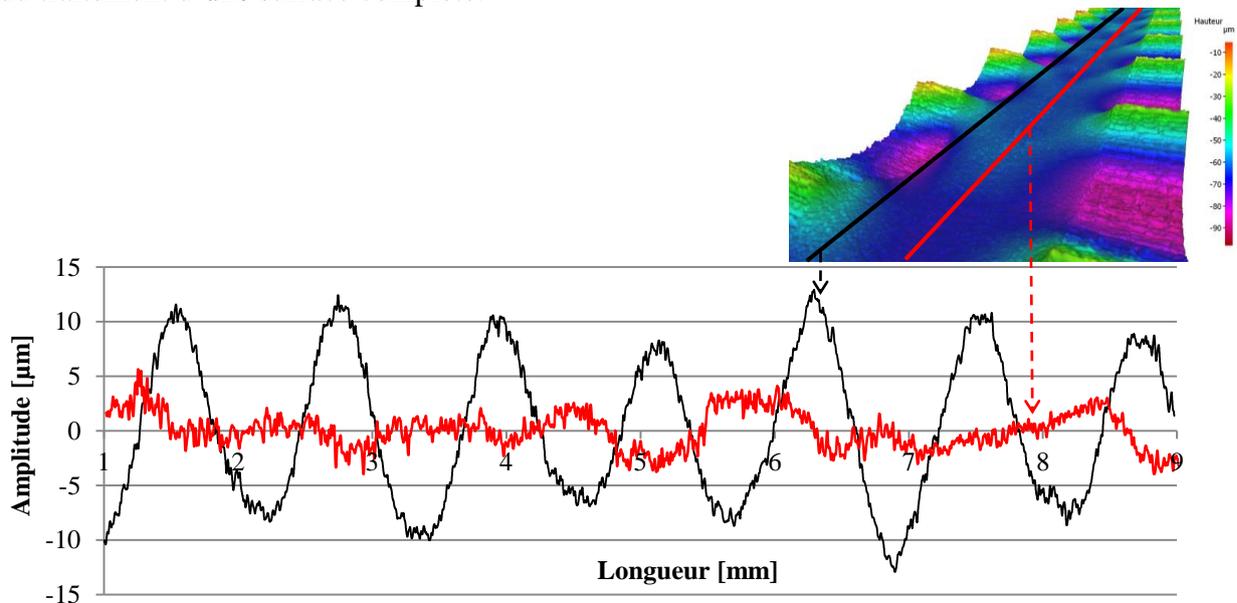


Figure 3.7: profils de topographies polies au centre et au bord du passage du faisceau

3.4.4 Conclusion

Cette approche expérimentale a permis de déterminer la position du domaine de faisabilité du procédé de polissage laser en fonction du procédé primaire. Les résultats obtenus montrent une corrélation entre la topographie initiale et la topographie finale. Une puissance de 750 W est adaptée à une hauteur de crête de 60 μm , tandis que des puissances plus élevées ne sont pas appropriées à des hauteurs de crêtes plus conséquentes.

L'optimisation du lissage se quantifie par l'évolution de la topographie initiale, qui passe d'une fréquence régulière à une fréquence finale chaotique. Cette évolution de topographie est conforme au phénomène de lissage qui se traduit par une fonte des pics et un remplissage des cavités. Le procédé de polissage laser influence différemment en fonction de l'échelle d'observation de la topographie. Ainsi, il s'avère que le phénomène de fonte a un impact sur l'ondulation et la rugosité de la surface.

Selon une vision globale de fabrication, les paramètres opératoires de polissage laser retenus suite à ces expérimentations sont ajustés à la hauteur de crête initiale et permettent de réaliser un lissage proche de l'optimum.

3.5 Etude avancée

3.5.1 Expérimentations

A partir des essais de faisabilité, la campagne expérimentale suivante a pour objectif d'établir un modèle de prédiction statistique. Compte tenu des objectifs énoncés, ce modèle intègre la topographie initiale, les paramètres de polissage laser et le taux de recouvrement de passes.

Le polissage laser d'une surface complète nécessite la prise en compte d'un paramètre supplémentaire, qui est le taux de recouvrement de passe (Overlap) (%). Ce paramètre permet de traiter totalement la surface par le recouvrement de la passe N par la passe N+1 (Figure 3.8). Un taux de recouvrement de 0% signifie que la passe N+1 ne recouvre pas la passe N, et un taux de recouvrement de 100% implique que le faisceau passe deux fois au même endroit. La largeur de passe est mesurée expérimentalement, et correspond à la largeur de matière fondue pour une densité d'énergie donnée et une hauteur de crête.

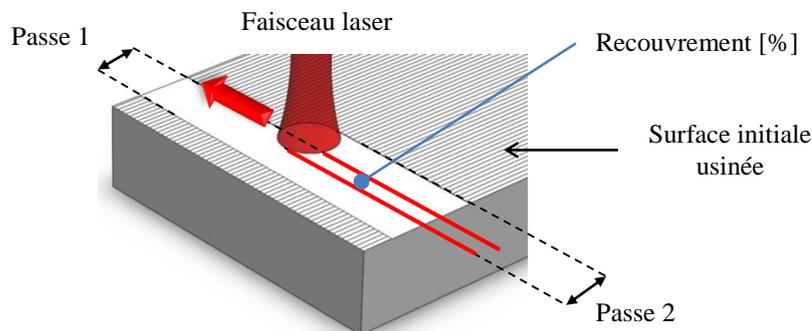


Figure 3.8: principe du taux de recouvrement de passe

Les paramètres étudiés dans cette campagne expérimentale sont les suivants :

- La hauteur de crête (h_c) [μm]
- La puissance laser (P) [W]
- L'avance (V_f) [mm/min]

- L'offset (O_f) [mm]
- Le taux de recouvrement ou Overlap (O_v) [%]

La matrice expérimentale doit permettre de modéliser le système étudié selon les paramètres précédents jugés influents. Pour cela, une matrice de type Taguchi L_{16}^{45} a été utilisée (Tableau 3.2).

Ce type de matrice expérimentale permet d'étudier 5 facteurs à 4 niveaux pour seulement 16 essais. L'avantage de ce type de matrice se situe au niveau de la minimisation du nombre d'essais. Pour information, suivant les facteurs jugés influents (5) et un nombre de niveau égal à 4, un plan d'expérience complet nécessiterait 625 essais, ce qui est difficilement envisageable expérimentalement, sans compter le temps d'acquisition des mesures et de traitement.

Le nombre de niveaux est un paramètre à ne pas négliger. Un nombre de niveau égal à 2 permet d'étudier seulement les systèmes linéaires, ce qui n'est pas le cas du procédé de polissage laser. Il est donc pertinent de maximiser le nombre de niveaux tout en limitant le nombre d'essais, en vue d'approcher statistiquement au plus près le système étudié.

La difficulté de la modélisation expérimentale se situe sur la capacité du modèle à approcher le système réel tandis que celui-ci est inconnu. C'est pourquoi une maximisation du nombre de niveaux de la matrice est nécessaire, car cela permet une plus grande flexibilité de l'ajustement du modèle aux données expérimentales.

Les réglages des paramètres sont issus des essais de faisabilité effectués sur une ligne et les réglages du taux de recouvrement se basent sur la bibliographie [Lamikiz2007]. Il est important de maximiser le domaine d'étude en vue de généraliser au mieux le modèle et de déterminer précisément la position de l'optimum. Dans cette étude, les plages de paramètres utilisées encadrent les paramètres déterminés lors de l'étude de faisabilité.

<i>Essais</i> <i>N°</i>	<i>hc</i> [μm]	<i>Puissance</i> [W]	<i>Avance</i> [mm/min]	<i>Offset</i> [mm]	<i>Overlap</i> [%]
1	40	750	500	0	20
2	40	850	1000	10	30
3	40	950	1500	20	40
4	40	1050	2000	30	50
5	50	750	1000	20	50
6	50	850	500	30	40
7	50	950	2000	0	30
8	50	1050	1500	10	20
9	60	750	1500	30	30
10	60	850	2000	20	20
11	60	950	500	10	50
12	60	1050	1000	0	40
13	70	750	2000	10	40
14	70	850	1500	0	50
15	70	950	1000	30	20
16	70	1050	500	20	30

Tableau 3.2 : matrice expérimentale de type Taguchi et valeurs des paramètres opératoires

3.5.2 Matériel

Le laser utilisé est identique à celui employé lors des essais de faisabilité. En revanche, une cellule de confinement a été utilisée afin de maîtriser l'apport d'argon lors du polissage de surfaces. Les surfaces polies comportent des dimensions de 28 x 21 mm. Les échantillons sont divisés en 8 surfaces, chacune étant un essai de la matrice expérimentale (Figure 3.9).

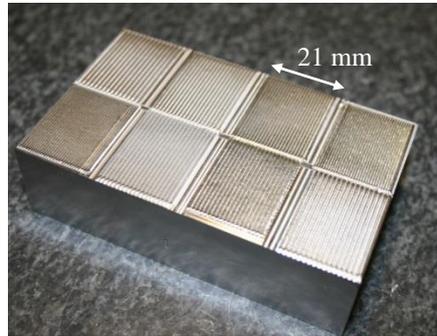


Figure 3.9: topologie des échantillons

Les surfaces polies sont caractérisées par le paramètre de rugosité surfacique (S_a) [μm] suivant la norme NF EN ISO 25178-2 [Norme NF EN ISO 25178-2]. L'optimisation de la topographie est quantifiée par le pourcentage de réduction de rugosité surfacique (Eq.3.1). Le filtre de coupure utilisé pour le calcul des paramètres de rugosité est conforme à la norme 4288 [NF EN ISO 4288].

$$\text{Réduction de rugosité surfacique (\%)} = \frac{S_{a_{\text{initial}}} - S_{a_{\text{poli}}}}{S_{a_{\text{poli}}}} \times 100 \quad \text{Eq.3.1}$$

3.5.3 Incertitudes de mesures et variabilité du procédé

En vue d'améliorer la compréhension et l'analyse des résultats expérimentaux, il est nécessaire de déterminer précisément les sources d'erreurs pouvant influencer l'interprétation des résultats. Ces sources d'erreurs, nommées incertitudes, sont susceptibles de provenir de l'appareil de mesure et / ou du moyen de production. L'incertitude de mesure est calculée selon la norme GUM [JCGM2008] nommée incertitude élargie (U) (Eq.3.2) et est obtenue par la multiplication de l'incertitude type composée (u_c) (Eq.3.3) à un facteur d'élargissement (k). Dans cette étude, le coefficient d'élargissement est choisi pour un niveau de confiance de 95%, ce qui correspond à un facteur $k = 2$.

$$U = u_c k \quad \text{Eq.3.2}$$

$$u_c = \frac{\sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{\sqrt{n}} \quad \text{Eq.3.3}$$

L'incertitude de mesure porte sur la répétabilité du moyen de mesure ainsi que sur l'aire et la position de l'analyse. La répétabilité de mesure renseigne sur la fidélité de mesure de l'appareil selon un ensemble de conditions de répétabilité. Dans ce cas, la mesure est répétée N fois exactement dans les mêmes conditions : le même opérateur, la même machine, la même pièce et les mêmes réglages.

Dans le cas étudié, la mesure de rugosité surfacique est répétée 10 fois selon les mêmes réglages du microscope, qui sont l'intensité lumineuse et le contraste.

Lors de la détermination des paramètres de rugosité surfacique, une zone de mesure doit être déterminée arbitrairement (Figure 3.10). La taille de la zone de mesure ainsi que son positionnement peuvent avoir un impact sur le mesurande, c'est pourquoi l'incertitude est étudiée. Différentes aires d'analyses sont effectuées à différentes positions en vue de calculer l'incertitude associée.

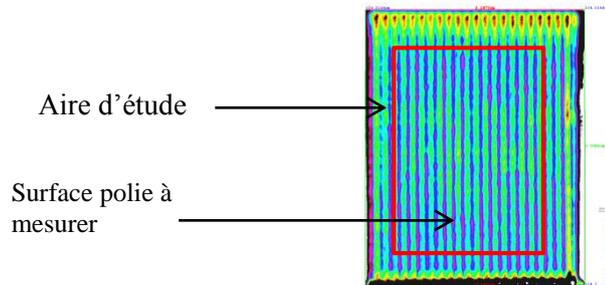


Figure 3.10: sélection d'une zone d'étude sur la surface à analyser

La variabilité du procédé renseigne sur la capacité du procédé à reproduire avec justesse une opération. Dans ce cas, 8 surfaces ont été polies par laser, suivant les mêmes conditions opératoires, appliquées à une même topographie initiale.

3.5.4 Résultats et analyses

3.5.4.1 Incertitudes de mesures et variabilité du procédé

Les incertitudes de mesure montrent que l'appareil n'a pas de grande influence sur le S_a (Tableau 3.3 et 3.4). En revanche, la variabilité du procédé de polissage laser (Tableau 3.5) a un impact sur la rugosité surfacique. Les valeurs de rugosités surfaciques seront bornées par une incertitude totale qui correspond à un intervalle de $\pm 0,20 \mu\text{m}$.

<i>Paramètre</i>	<i>U_{répétabilité}</i>	<i>Unité</i>
S_a	0,002	μm

Tableau 3.3: incertitude sur la répétabilité de mesure

<i>Paramètre</i>	<i>U_{aire de mesure}</i>	<i>Unité</i>
S_a	0,017	μm

Tableau 3.4: incertitude sur l'aire de mesure

<i>Paramètre</i>	<i>U_{variabilité}</i>	<i>Unité</i>
S_a	0,18	μm

Tableau 3.5: incertitude sur la variabilité du procédé de polissage laser

3.5.4.2 Expérimentations

Les résultats expérimentaux montrent que le polissage laser permet d'obtenir un S_a final optimal de $2,1 \pm 0,20 \mu\text{m}$ pour un S_a initial de $13,73 \mu\text{m}$, amenant ainsi à une réduction de 85 % (Tableau 3.6). Les paramètres optimaux déterminés sont une puissance de 750 W, une avance de 1500 mm/min, un offset de 30 mm, un Overlap de 30 % et une hauteur de crête de 60 μm .

Essais N°	h_c [μm]	Puissance [W]	Avance [mm/min]	Offset [mm]	Overlap [%]	S_a initial [μm]	S_a final [μm]	Réduction [%]
1	40	750	500	0	20	9,73	4,5	54
2	40	850	1000	10	30	9,74	3,3	66
3	40	950	1500	20	40	9,78	4,8	51
4	40	1050	2000	30	50	9,87	5,2	47
5	50	750	1000	20	50	11,67	2,3	81
6	50	850	500	30	40	11,69	2,5	78
7	50	950	2000	0	30	11,65	6,3	46
8	50	1050	1500	10	20	11,85	4,4	63
9	60	750	1500	30	30	13,73	2,1	85
10	60	850	2000	20	20	13,64	3,9	72
11	60	950	500	10	50	13,81	3,3	76
12	60	1050	1000	0	40	13,55	5,2	62
13	70	750	2000	10	40	15,78	4,7	70
14	70	850	1500	0	50	15,83	6,1	62
15	70	950	1000	30	20	15,65	2,9	81
16	70	1050	500	20	30	15,79	7,6	52

Tableau 3.6 : matrice expérimentale L_{16} et résultats des essais

Cependant, après polissage laser la topographie initiale reste présente (Figure 3.11) et le passage du faisceau laser a tendance à donner une texture directionnelle et perpendiculaire à la surface initiale. La fréquence finale est identique à la fréquence de la surface initiale suivant l'axe y (Figure 3.12). En revanche, l'amplitude est atténuée par le polissage laser. Cette similitude de fréquence avant et après polissage laser signifie que la topographie initiale n'est pas totalement éliminée et que le processus de lissage n'est pas optimal. Concernant l'axe x, la fréquence du profil est aussi régulière (Figure 3.13). Ce phénomène peut être causé par le taux de recouvrement de passe.

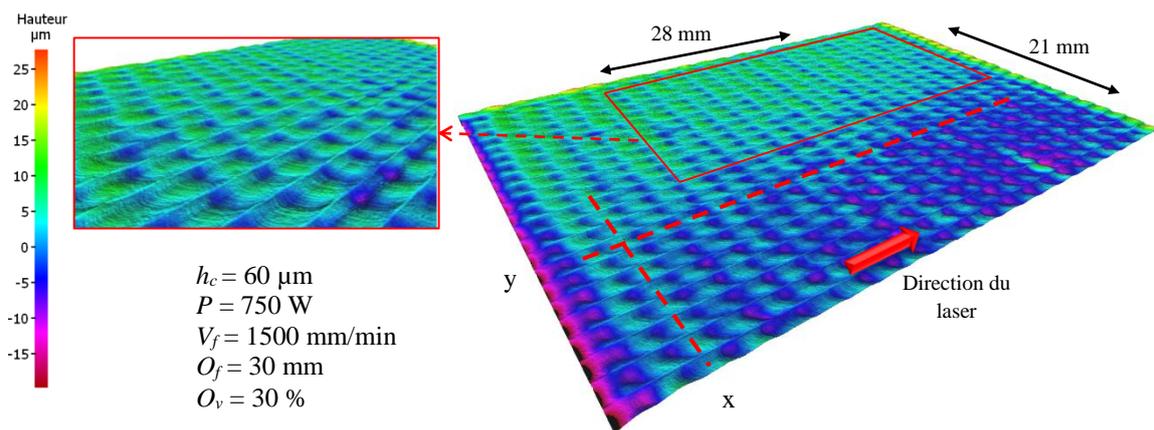


Figure 3.11: topographie finale polie par laser suivant les paramètres optimaux déterminés

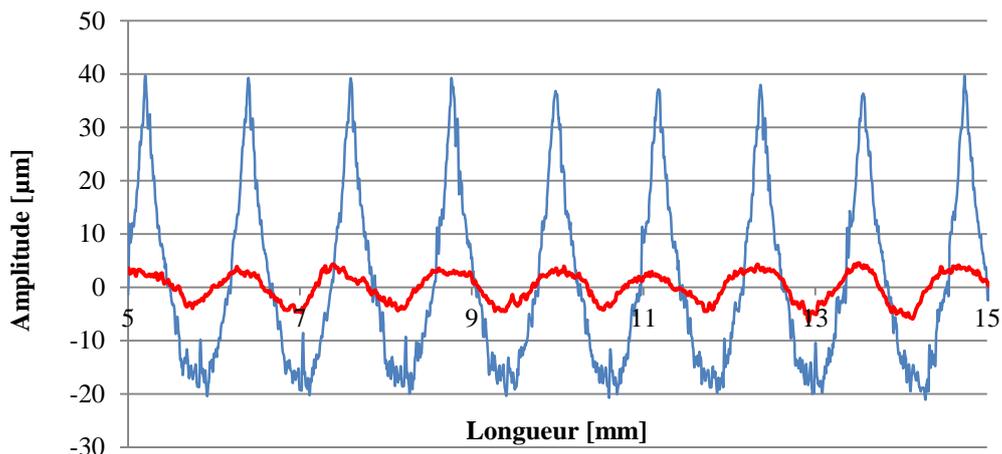


Figure 3.12: profils de rugosité avant et après polissage laser (Axe Y) suivant les paramètres optimaux déterminés par la matrice expérimentale

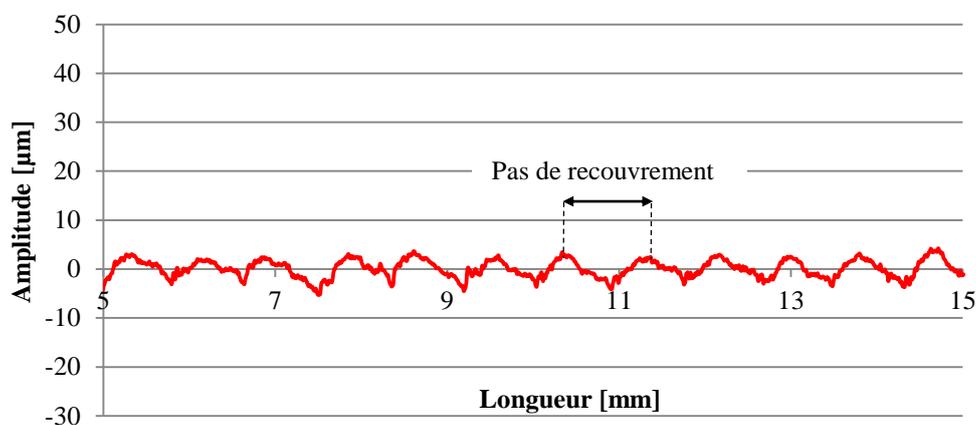


Figure 3.13: profil de rugosité après polissage laser (Axe X) suivant les paramètres optimaux déterminés par la matrice expérimentale

Les matrices expérimentales de type Taguchi permettent de modéliser le système mais aussi d'étudier l'impact des facteurs influents sur la réponse. Dans ce cas, il est possible de hiérarchiser l'impact des facteurs influents sur le résultat. Cependant, la matrice L_{16} est « aliassée » ce qui signifie que certaines interactions entre les paramètres sont dissimulées au sein des effets. Un alias ne permet pas de quantifier l'impact d'un facteur, car il est composé d'une interaction plus l'effet du facteur étudié. Un graphe des effets associé à chaque matrice est disponible, et renseigne sur la position des interactions (Figure 3.14). Il est alors possible de réaliser une analyse logique concernant l'interaction des facteurs. Dans le cas de la matrice L_{16} , les interactions entre le facteur 1 et 2, soit respectivement la topographie initiale et la puissance, sont dissimulées au sein des colonnes de l'avance, de l'offset et de l'Overlap. Ainsi, la topographie initiale et la puissance ne contiennent pas d'interaction, ce qui permet de comparer leurs effets sur la rugosité surfacique (Figure 3.15).

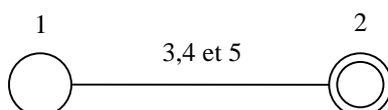


Figure 3.14: graphe des effets de la matrice L_{16}

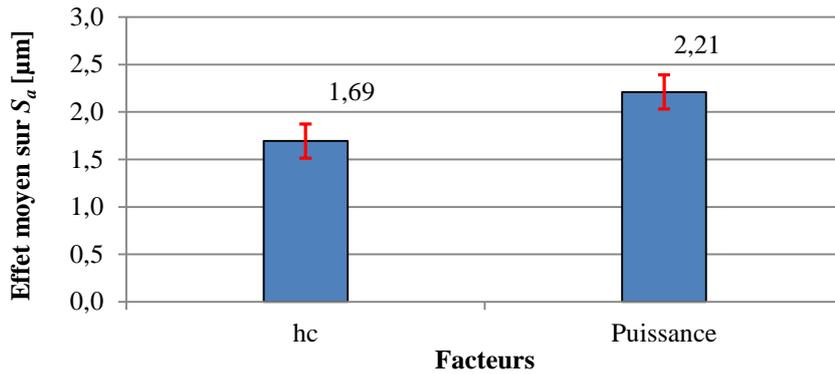


Figure 3.15: effets de h_c et P sur S_a

Le graphe des effets montre que la topographie initiale est un paramètre influent sur la réponse au même titre que la puissance qui est un paramètre opératoire du laser. Ce constat appuie l'hypothèse de l'optimisation multi-process, autrement dit l'optimisation du procédé de polissage laser doit s'effectuer en fonction de la topographie initiale.

3.5.5 Conclusion

Cette campagne exploratoire montre une certaine efficacité du procédé de polissage laser. Les conditions expérimentales permettent d'obtenir un pourcentage de réduction de la rugosité surfacique maximal de 85 % pour un S_a de $2,1 \pm 0,20 \mu\text{m}$. Cependant, les paramètres opératoires déterminés optimaux ne permettent pas d'éliminer totalement la topographie initiale, ce qui nécessite la réalisation d'une étape d'optimisation. Enfin, grâce à la méthode de Taguchi, l'étude met en avant un fort impact de la topographie initiale et cela au même titre que la puissance qui est un paramètre opératoire du procédé de polissage laser.

3.6 Modélisation

3.6.1 Apprentissage du modèle

L'étape de modélisation a deux objectifs bien précis : la prédiction des paramètres opératoires pour une rugosité surfacique donnée, et la détermination de la position du domaine optimal.

Un modèle statistique se divise en deux parties. La première partie est la régression, qui consiste à déterminer l'équation qui s'approche au mieux des données expérimentales. Cette étape est appelée apprentissage du modèle. La difficulté majeure de la régression est de déterminer l'équation la plus adaptée aux données expérimentales.

La seconde partie est la généralisation du modèle, qui est la capacité prédictive de ce dernier. L'aspect généralisation est un point important, car c'est l'objectif premier du modèle qui est de prédire le résultat entre les données expérimentales.

Compte tenu d'un nombre de niveaux de la matrice égal à quatre, il est possible de construire un modèle de régression quadratique entre les données expérimentales (Eq.3.4).

$$y_{\text{modélisé}} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + \dots + b_{kk}x_k^2 \quad \text{Eq.3.4}$$

L'équation de régression est composée d'une partie linéaire et d'une partie quadratique mise en avant par l'élévation des monômes au carré. Le nombre de monômes, est fonction du nombre de facteurs et du nombre de degrés de régression.

Afin de permettre à la régression d'approcher au mieux les données expérimentales, il est nécessaire de limiter au maximum la variance. Pour cela, il est pertinent d'intégrer la variabilité du procédé au sein du modèle. Après calcul, le modèle de régression statistique est obtenu (Eq.3.5) et permet de prédire le pourcentage de réduction de rugosité surfacique en fonction de h_c , P , V_f , O_f et O_v .

Eq.3.5

$$S_a(\%) = -166,77 + 5,44 * h_c - 0,045 * h_c^2 + 0,22 * P - 0,15. 10^{-3} * P^2 + 0,002 * V_f - 0,12. 10^{-4} * V_f^2 + 0,643 * O_f - 0,006 * O_f^2 - 0,92 * O_v + 0,012 * O_v^2$$

À des fins prédictives, il est important que l'architecture du modèle soit représentative des données expérimentales. En vue de quantifier l'écart du modèle vis-à-vis des données, le paramètre R^2 est calculé. Ce paramètre quantifie la corrélation entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs expérimentales.

Après calcul, la corrélation entre les données prédites par le modèle et les valeurs mesurées est de 88% (Figure 3.16). Ainsi, l'architecture du modèle dispose d'une erreur d'ajustement de 12 %, qui représente l'écart du modèle vis-à-vis des données expérimentales. Cet écart d'ajustement a forcément un impact sur la capacité prédictive du modèle, c'est pourquoi il est nécessaire de tester le modèle pour les valeurs extérieures à l'architecture.

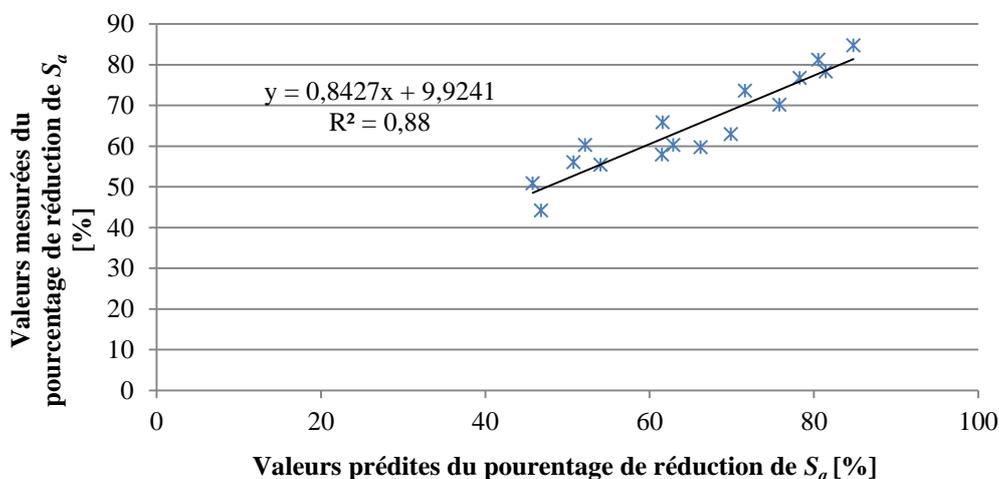


Figure 3.16: corrélation entre les valeurs mesurées et prédites du pourcentage de réduction de S_a par le modèle statistique

À partir du modèle construit, et par un calcul simple (Eq.3.6), il est possible de calculer le paramètre de rugosité surfacique prédit. Pour ce paramètre, la corrélation des valeurs prédites et mesurées du S_a est de 85% (Figure 3.17).

$$S_a \text{ prédit} = \frac{S_a \text{ initial mesuré} * \% S_a \text{ prédit}}{100} \quad \text{Eq.3.6}$$

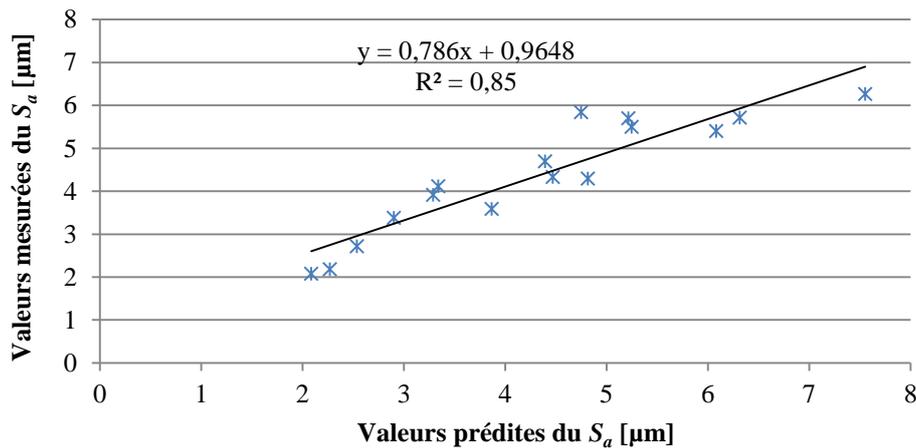


Figure 3.17: corrélation entre les valeurs mesurées et prédites du S_a par le modèle statistique

3.6.2 Généralisation du modèle

Comme mentionné précédemment, la généralisation du modèle est l'objectif premier de la modélisation, qui dans le cas étudié, permet la détermination des paramètres opératoires selon une topographie finale souhaitée. La quantification de l'apprentissage du modèle par le paramètre R^2 ne renseigne pas sur la capacité prédictive du modèle. Il est donc insuffisant d'utiliser seulement ce paramètre.

Le paramètre R^2 se focalise sur les points qui ont servi à la construction du modèle en quantifiant la corrélation entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites par le modèle. En aucun cas le R^2 ne donne de renseignements sur les points situés entre des points expérimentaux, qui sont la cible de la prédiction.

Afin de quantifier la capacité prédictive du modèle, la méthode de validation croisée est utilisée. Le principe de cette méthode est de construire un modèle sur $N-1$ points en vue de prédire le point N extrait de l'architecture. Cette opération est réalisée pour chaque point, ce qui donne 16 modèles à $N-1$ points. Ainsi, la prédiction est effectuée sur des points extérieurs à l'architecture du modèle, au même titre qu'une validation expérimentale. Autrement dit, la validation croisée permet de tester le comportement du modèle entre les points expérimentaux.

Après calcul des 16 modèles et des 16 points, l'erreur prédictive moyenne du modèle quadratique est de 11,5 % (Figure 3.18). Compte tenu de l'écart moyen d'erreur prédictive qui représente un faible pourcentage, la capacité prédictive du modèle est relativement acceptable.

Cependant, trois points disposent d'une erreur prédictive conséquente (essais 1, 4 et 13). Cette erreur prédictive est susceptible de provenir de deux sources. La première concerne l'ajustement du modèle aux données expérimentales. Le modèle polynomial impose une forme particulière, qui force la régression par rapport aux données. Dans ce cas, le modèle subit un sur-ajustement par rapport aux données, ce qui tend à créer des écarts d'ajustement sur d'autres points. Une augmentation de l'ordre de régression est une alternative logique quant à l'amélioration de l'ajustement. Cependant, le cas échéant, le modèle subirait un sur-ajustement plus conséquent, diminuant ainsi la capacité prédictive du modèle. La seconde source d'erreur peut provenir de la discrétisation du domaine. Des valeurs trop éloignées des paramètres opératoires sont susceptibles de dissimuler un point distant vis-à-vis du modèle. Parallèlement, des valeurs opératoires trop rapprochées limitent le volume de solution du modèle.

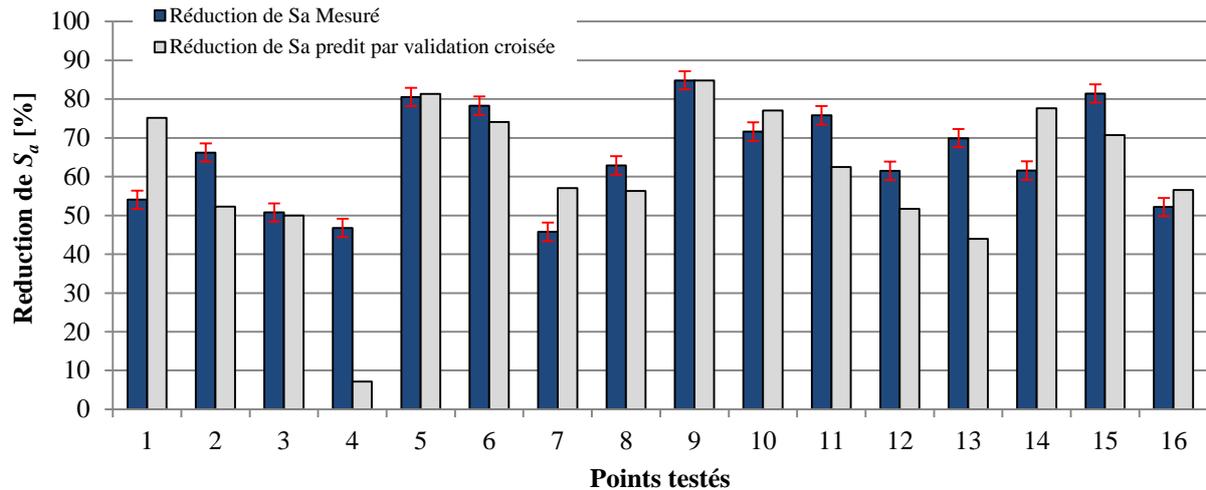


Figure 3.18: capacité prédictive du modèle quadratique selon la méthode de validation croisée

3.6.3 Validation expérimentale

Au même titre que la validation croisée, la validation expérimentale a pour objectif de tester la capacité prédictive du modèle sur des points extérieurs à l'architecture. Dans cette optique, des paramètres intermédiaires à la matrice expérimentale ont été utilisés (Tableau 3.7).

<i>Essais</i> <i>N°</i>	<i>hc</i> [μm]	<i>Puissance</i> [W]	<i>Avance</i> [mm/min]	<i>Offset</i> [mm]	<i>Overlap</i> [%]	<i>S_a initial</i> [μm]
1	45	800	750	5	25	10,2
2	55	900	1250	15	35	11,7
3	65	1000	1750	25	45	12,7
4	45	900	1250	25	45	10,2
5	55	800	750	5	35	11,7
6	65	1000	750	15	25	12,7
7	45	1000	1750	15	35	10,2
8	55	1000	750	25	45	11,7

Tableau 3.7 : paramètres testés pour la validation expérimentale du modèle statistique

Suite à la réalisation des essais, il ressort que le modèle statistique construit dispose d'une erreur prédictive moyenne de 3,6 % concernant le pourcentage de réduction de S_a (Figure 3.19) et une erreur moyenne de 0,4 μm pour la rugosité surfacique (Figure 3.20).

En revanche, deux points du modèle disposent d'une erreur conséquente notamment concernant le S_a . Comme énoncé précédemment, cette erreur peut provenir d'un phénomène de sur-ajustement ou de la discrétisation du domaine, notamment concernant le paramètre d'avance, qui dispose d'une grande plage de variation au sein de l'architecture.

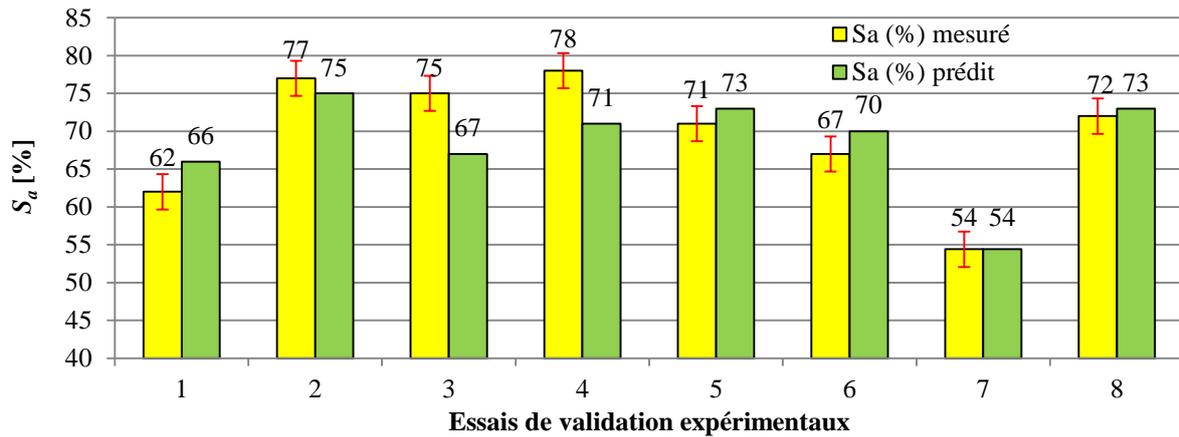


Figure 3.19: valeurs mesurées et prédites du pourcentage de réduction de S_a

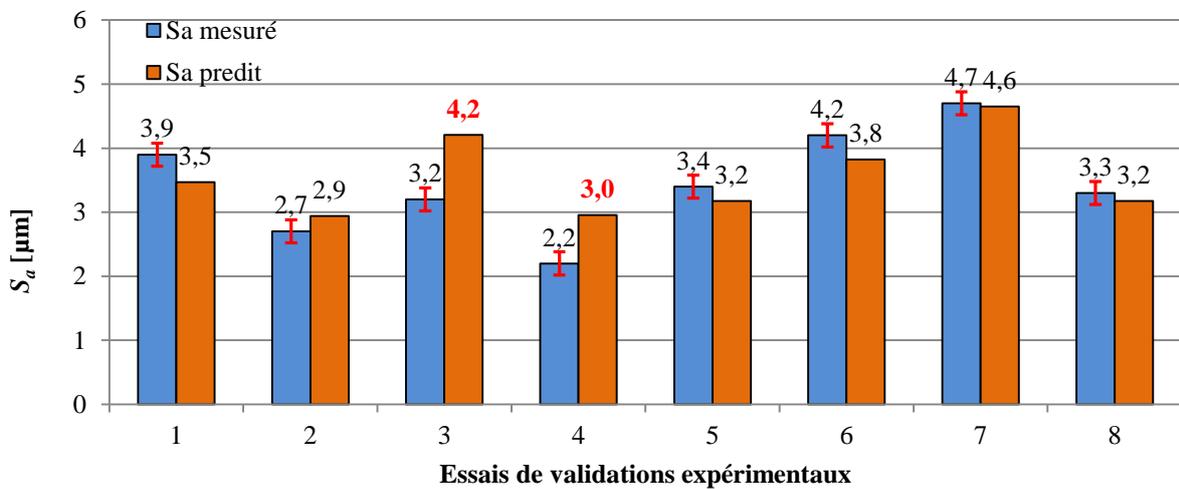


Figure 3.20: valeurs mesurées et prédites de la rugosité surfacique

3.6.4 Conclusion

La méthode Taguchi a permis de construire un modèle de prédiction quadratique en fonction de 5 facteurs, 4 niveaux et cela en seulement 16 essais. Le modèle obtenu dispose d'un bon apprentissage quantifié par un R^2 de 0,88. La capacité prédictive du modèle est relativement acceptable puisque l'erreur expérimentale moyenne est de 3,6 % concernant le pourcentage de réduction de la rugosité surfacique et de 0,4 μm pour le S_a .

3.7 Optimisation

3.7.1 Optimisation du taux de recouvrement de passe

L'étape suivante consiste à déterminer le domaine optimum selon les paramètres opératoires et la topographie initiale pour une rugosité surfacique finale. Pour cela, la méthode des surfaces de réponses a été utilisée. A partir d'une régression quadratique entre les paramètres opératoires et la fonction objectif, il est possible de construire une surface de réponse qui permette de déterminer visuellement le domaine optimal. Le haut de la surface de réponse représente le point optimal et renseigne sur les paramètres opératoires à utiliser.

Ainsi, les surfaces de réponse montrent que la puissance est bien optimisée par rapport à la topographie initiale (Figure 3.21). Concernant l'avance, la surface de réponse permet de préconiser une valeur de 1000 mm/min pour une hauteur de crête de 60 μm . Cependant, le domaine optimal de l'Overlap par rapport à la hauteur de crête se situe hors du volume expérimental. La surface de réponse associée permet de préconiser des valeurs de taux de recouvrement supérieures à 50 % ou inférieures à 20 %.

Compte tenu d'une distribution de la densité d'énergie de type Gaussienne pour un Offset de 30 mm et une certaine hauteur de crête, il est plus judicieux d'employer des valeurs d'Overlap supérieure à 50 %. En effet, comme cité précédemment dans ce chapitre, le polissage laser est moins efficace sur les bords du faisceau laser en matière de lissage. De ce fait, en vue d'éliminer totalement la topographie initiale, il est préférable d'augmenter le taux de recouvrement, qui privilégie la zone de forte densité d'énergie de la distribution Gaussienne ce qui peut améliorer le lissage. De plus, des taux de recouvrement supérieurs à 50 % sont susceptibles d'optimiser l'élimination de la topographie initiale dans le sens de l'avance. Dans ce cas, le laser recouvre plusieurs fois une même zone de la surface ce qui augmente le temps d'interaction et optimise l'écoulement de la matière en fusion.

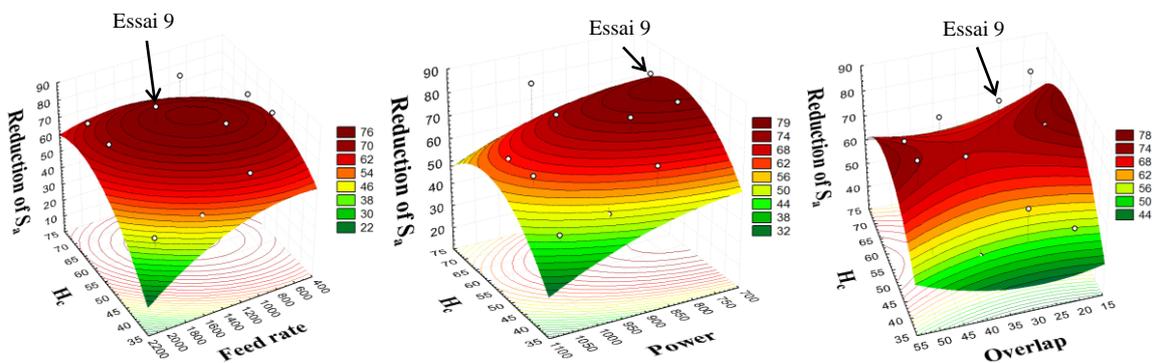


Figure 3.21: surfaces de réponses des données expérimentales

Compte tenu des surfaces de réponses, l'étape d'optimisation consiste à augmenter le taux de recouvrement de passe pour une avance optimale de 1000 mm/min et un h_c de 60 μm . Globalement l'augmentation du taux de recouvrement a tendance à diminuer la rugosité surfacique (Figure 3.22) pour des valeurs situées au-dessus de 50 %. Ainsi, il est possible de construire un modèle comportemental du paramètre pour les valeurs optimales situées entre 50 et 90 %. Le modèle mathématique construit dispose d'une corrélation de 98 % avec les données expérimentales, ce qui constitue une très bonne robustesse vis-à-vis des prédictions. Le modèle de régression est effectif pour les paramètres de puissance, d'avance, d'offset et d' h_c déterminés optimaux.

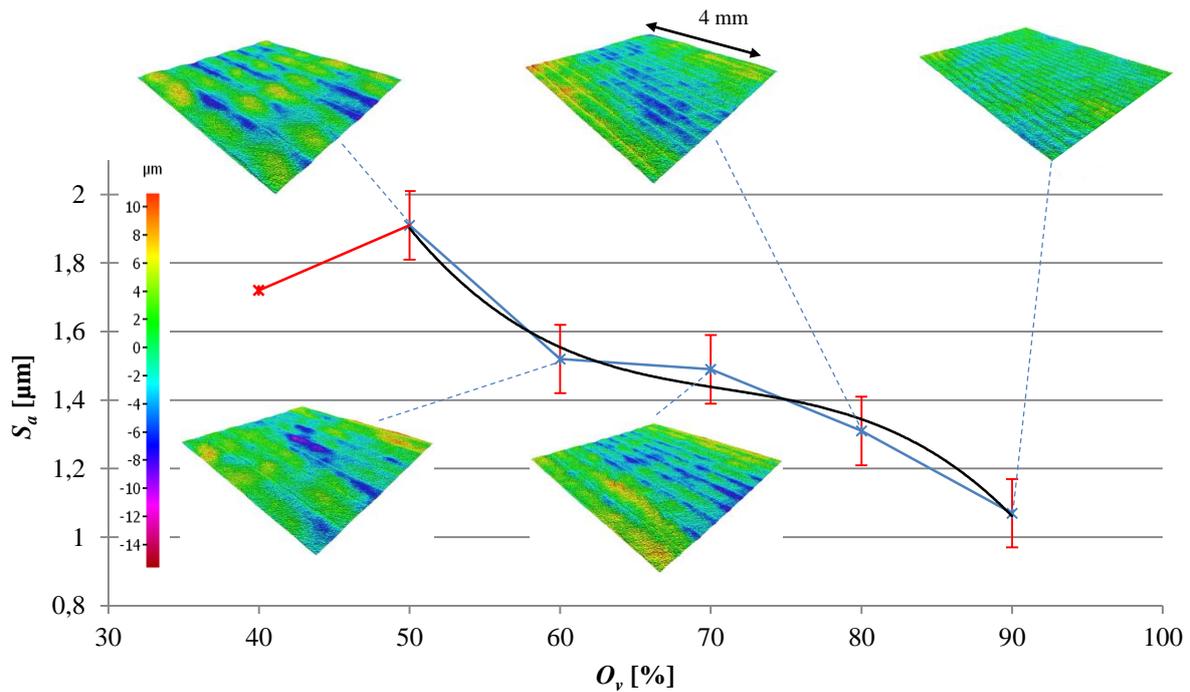


Figure 3.22: modélisation du comportement du taux de recouvrement de passe

Une valeur de taux de recouvrement de 90 % permet d'obtenir une rugosité surfacique optimale de $0,94 \pm 0,2 \mu\text{m}$ ce qui amène à un pourcentage de réduction de S_a de 93 % (Figure 3.23). L'augmentation de l'Overlap a tendance à augmenter le temps d'interaction entre le laser et la surface, ce qui permet de laisser plus de temps à la matière pour s'écouler et donc de diminuer l'amplitude de la topographie.

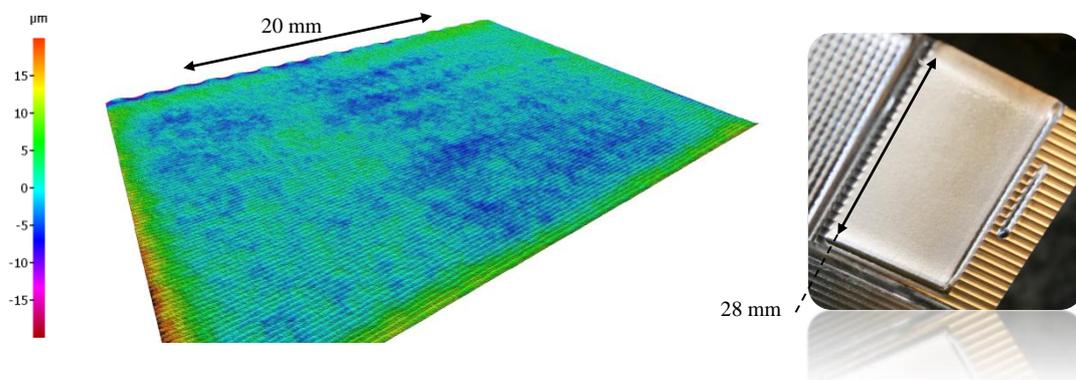


Figure 3.23: topographie optimisée suivant un taux de recouvrement de passe de 90 %

Le taux de recouvrement de passe est un paramètre ayant une influence sur les temps de cycles, c'est pourquoi il est nécessaire de faire la relation entre l'Overlap et la productivité. La courbe de productivité montre une forte augmentation des temps de cycles à partir d'un Overlap de 70 % (Figure 3.24). Vis-à-vis du comportement du taux de recouvrement et de sa courbe de productivité, il est montré que dans certains cas, une faible diminution de S_a peut engendrer une forte augmentation des temps de cycles. De ce fait, il est primordial de bien cibler le cahier des charges afin de ne pas réaliser une sur-qualité topographique qui pourrait avoir un impact négatif sur la productivité.

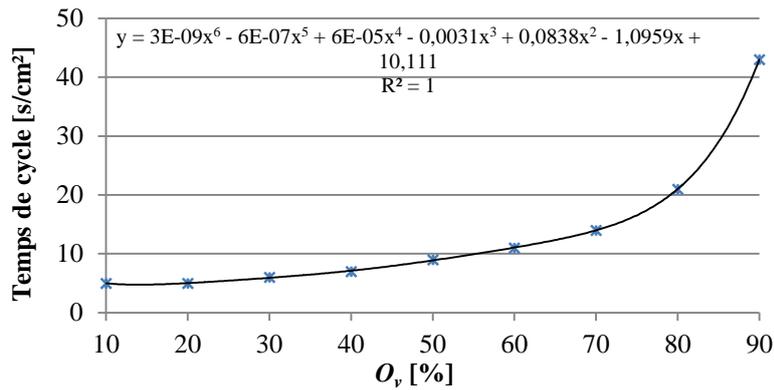


Figure 3.24: courbe de productivité du taux de recouvrement de passe

Le taux de recouvrement de passe a un impact géométrique sur la surface finale suivant l'axe perpendiculaire à h_c (Figure 3.25 ; 3.26 et 3.27). En effet, l'augmentation du taux de recouvrement a tendance à discrétiser géométriquement le profil de la topographie finale. Ce phénomène géométrique peut être engendré par la distribution de la densité d'énergie de type Gaussienne. Comme montré dans le paragraphe 3.4.3., la distribution de la densité d'énergie est moins efficace sur les bords du faisceau laser, ce qui diminue l'efficacité de lissage dans ces zones. Dans ce cas, la topographie initiale demeure sur les bords tandis qu'au centre elle est fortement atténuée. Dans le cas du polissage d'une surface ce phénomène est identique. Pour des taux de recouvrement faibles, la topographie initiale n'est pas éliminée par le recouvrement. Au final, ce phénomène géométrique est peut-être une répétition du manque d'efficacité de la distribution de densité d'énergie.

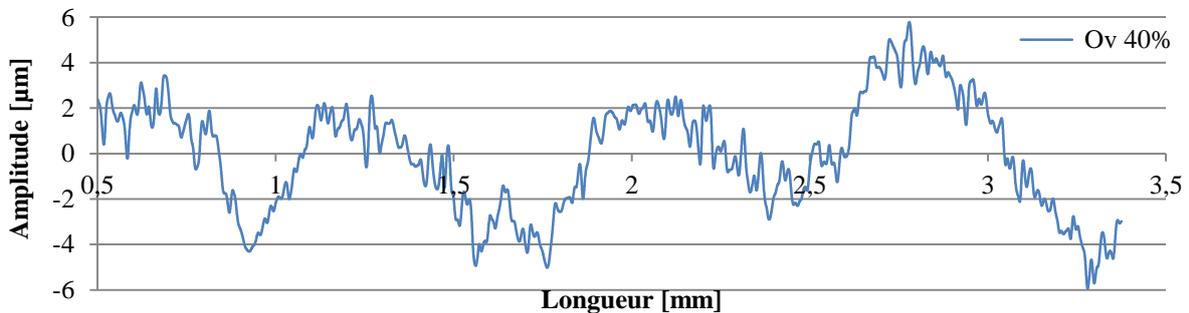


Figure 3.25: profil de rugosité perpendiculaire à h_c pour un Overlap de 40 %

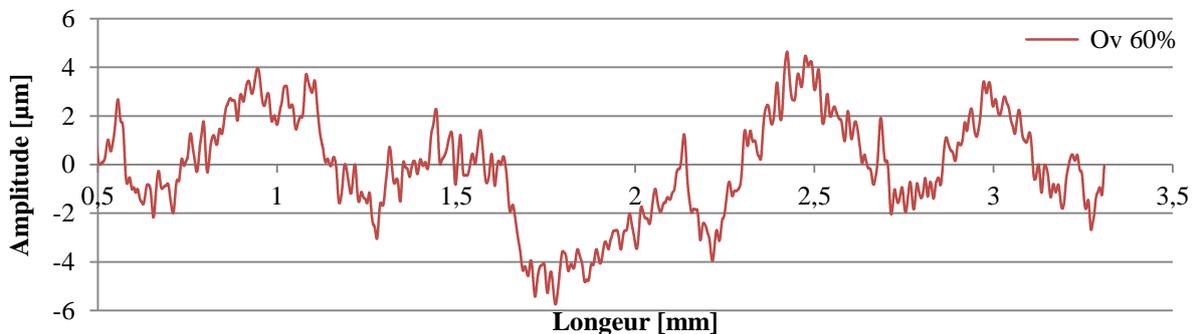


Figure 3.26: profil de rugosité perpendiculaire à h_c pour un Overlap de 60 %

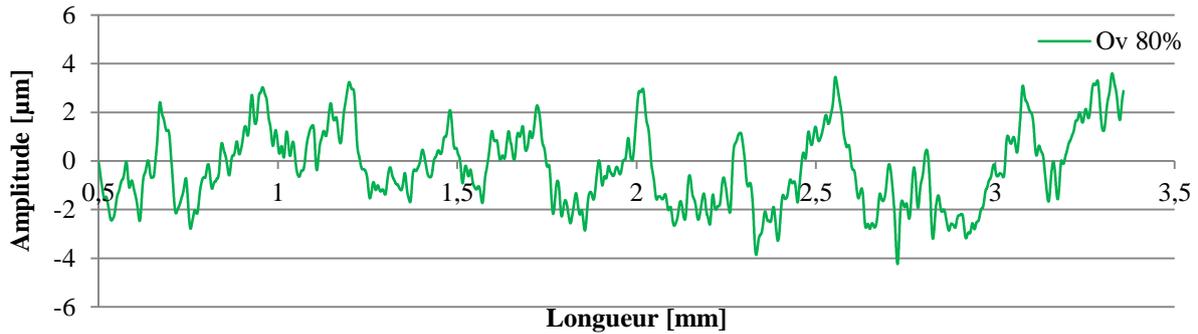


Figure 3.27: profil de rugosité perpendiculaire à h_c pour un Overlap de 80 %

3.7.2 Optimisation des temps de cycles

Lors du processus de polissage, différentes stratégies sont possibles, comme la stratégie ZIG ZIG ou ZIG ZAG. La stratégie ZIG ZAG est la stratégie la plus productive, car dans cette configuration le laser travaille durant l'allée et le retour, contrairement à la stratégie ZIG ZIG qui permet de ne polir la surface qu'à l'allée. Afin de déterminer la stratégie la plus productive à utiliser, il est nécessaire d'étudier leur impact sur la rugosité surfacique. La campagne d'expérience fait intervenir les mêmes paramètres opératoires sur la même topographie initiale afin de tester l'impact de la stratégie, qui est la seule variable. Les résultats montrent que la stratégie n'a pas d'impact sur la rugosité surfacique (Tableau 3.8) et qu'une stratégie de type ZIG ZAG est plus appropriée en matière de productivité.

	ZIG ZIG	ZIG ZAG
S_a [µm]	$2,03 \pm 0,2$	$2,05 \pm 0,2$

Tableau 3.8 : impact de la stratégie sur la rugosité surfacique

3.7.3 Optimisation multi-procédés

Dans un contexte d'optimisation multi-process, l'objectif est d'obtenir une rugosité surfacique finale minimale pour une rugosité surfacique maximale. Cela permet de diminuer les temps d'usinage et donc la consommation d'outils. Dans ce contexte, une hauteur de crête maximisée d'une valeur de 300 µm a été usinée puis polie par laser. À noter : cette hauteur de crête est largement supérieure aux hauteurs de crêtes étudiées précédemment qui étaient de l'ordre de 70 µm.

Afin d'obtenir une rugosité finale optimale, une stratégie multi-passes a été utilisée faisant intervenir un nombre total de 6 passes. Les 5 premières passes utilisent les paramètres opératoires optimaux déterminés précédemment. La sixième passe utilise une avance de 10 000 mm/min et est parallèle à la hauteur de crête initiale. L'optimisation par la stratégie de polissage permet d'obtenir une réduction de S_a de 99,2% pour un S_a initial de 64 µm et un S_a final de 0,53 µm (Figure 3.28).

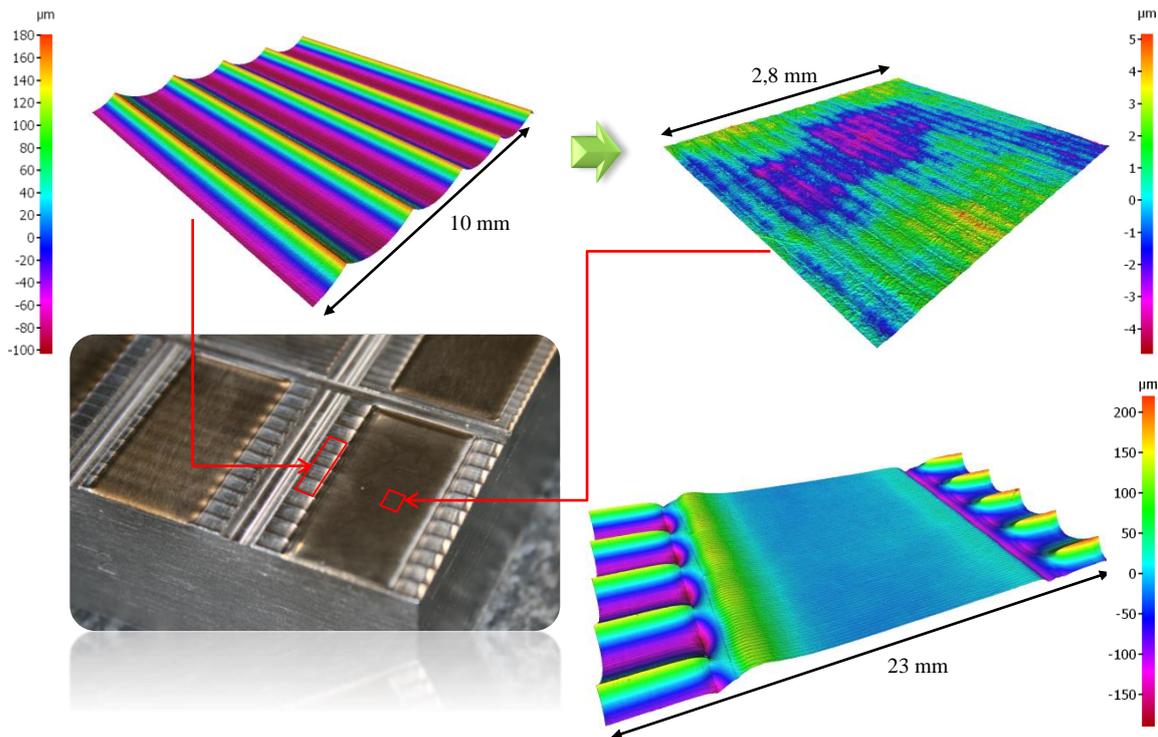


Figure 3.28: surface initiale d'un h_c de 300 μm polie suivant une stratégie multi-passes

3.7.4 Etude technico-économique

L'utilisation du procédé de polissage laser comporte des avantages, notamment concernant l'accessibilité des pièces de formes complexes ou encore le traitement de matériaux difficilement usinables. Ce procédé innovant doit également permettre de réaliser des gains de productivité afin d'optimiser les coûts de production. Dans cette optique, il est intéressant d'analyser le procédé de polissage laser vis-à-vis de ces capacités quant aux temps de cycles. L'objectif de cette étude est de comparer les temps de cycles du procédé de polissage et d'usinage pour une qualité finale identique dans le cas d'une fabrication de pièce de forme complexe (Tableau 3.9).

Les paramètres du procédé de polissage laser s'appuient sur les valeurs optimales déterminées précédemment, à savoir une avance de 1000 mm/min, un taux de recouvrement de passe de 90 % qui correspond à un pas de 0,14 mm et cela pour une hauteur de crête de 60 μm . La combinaison des paramètres optimaux permet d'obtenir un S_a final de $0,94 \pm 0,2 \mu\text{m}$.

Les paramètres d'usinage font intervenir une avance de 1000 mm/min, qui est l'avance utilisée pour ce type de matériau et trois passes, en vue d'obtenir un S_a de 1 μm . L'obtention du S_a final de 1 μm nécessite l'utilisation de trois passes, effectuées avec trois diamètres de fraise différents donnant ainsi trois pas de superposition a_e .

Les deux procédés utilisent une stratégie de type ZIG ZAG, et la hauteur de crête initiale est identique entre la première passe du procédé d'usinage et la passe du procédé de polissage laser.

Les résultats montrent que dans les conditions étudiées, le procédé de polissage laser n'apporte pas de gain quant à la productivité. Ce résultat est principalement dû à un plus faible pas de recouvrement de passe du procédé de polissage laser. Cependant, la productivité du procédé de

polissage laser peut être améliorée par une augmentation de l'avance, contrairement à l'usinage, où les conditions sont proches de l'optimum. Comme dans le cas du polissage multi-passes, il est possible d'utiliser des avances proches de 10 000 mm/min. En augmentant la puissance pour une telle avance, il serait possible d'optimiser la productivité du procédé de polissage laser. Enfin, le procédé de polissage laser garde un avantage quant à l'accessibilité des surfaces de faible courbure de par son faible diamètre de faisceau laser, qui dans le cas étudié est de 1,4 mm.

	<i>Avance</i> [mm/min]	<i>Pas</i> [mm]	<i>Productivité</i> [s/cm ²]	<i>Productivité totale</i> [s/cm ²]
Passé 1 UGV	1000	0,9	6,82	24,12
Passé 2 UGV	1000	0,35	17,30	
Passé 1 LP	1000	0,14	42	42

Tableau 3.9 : comparaison des temps de productivité de l'usinage et du polissage laser pour une qualité finale identique

Comme démontré dans le paragraphe 3.7.2. la stratégie de polissage laser n'a pas d'impact sur la rugosité finale. Dans ce cas, il est possible d'employer une stratégie Zig Zag lors de l'opération de polissage, contrairement à l'usinage qui préconise la coupe suivant une seule direction. Dans cette configuration, les temps de cycles du polissage peuvent être divisés par deux, amenant ainsi à une productivité de 21 s/cm² contre 24 s/cm² pour l'opération d'usinage.

3.7.5 Conclusion

Grâce aux surfaces de réponses il est montré que les paramètres opératoires de puissance et d'avance sont bien optimisés par rapport à la topographie initiale. Cependant, le domaine optimal du taux de recouvrement se situe hors de l'architecture du modèle précédemment construit. De ce fait, un modèle de comportement du taux de recouvrement de passe est proposé afin de prédire la rugosité finale en fonction des paramètres opératoires optimaux déterminés par le modèle quadratique. Compte tenu des surfaces de réponses, il est montré que l'augmentation de l'Overlap tend à diminuer le S_a final, amenant à une optimisation de 93 % pour un S_a final de $0,94 \pm 0,2 \mu\text{m}$. En matière de productivité, il est recommandé d'utiliser une stratégie de type Zig Zag afin de diminuer les temps de cycles. Enfin, le procédé de polissage laser dispose d'une grande efficacité de réduction de rugosité, allant jusqu'à 99 % donnant ainsi un S_a final de $0,5 \mu\text{m}$.

3.8 Protocole de détermination des paramètres multi-procédés

Compte tenu des résultats déterminés dans ce chapitre, le procédé de polissage laser permet d'obtenir différentes qualités de surfaces, dépendantes des réglages des paramètres opératoires. Le protocole utilisateur proposé s'articule autour de trois entités de détermination de paramètres, optimisés vis-à-vis des contraintes du cahier des charges (Figure 3.29). Ainsi, à partir de la fonction objectif et à travers les modèles mathématiques et les expérimentations, il est possible de déterminer les valeurs opératoires des paramètres à utiliser lors des opérations d'usinage et de polissage laser.

La première entité du protocole permet de déterminer les paramètres opératoires pour une rugosité surfacique supérieure à $2,1 \mu\text{m}$. La détermination des paramètres s'appuie sur le modèle quadratique, dont les données d'entrées sont la hauteur de crête, la puissance, l'avance,

l'Offset et le taux de recouvrement de passe, effectifs au sein d'un domaine de validité dictée par l'architecture du modèle. Le modèle quadratique ne permet pas de déterminer directement le S_a désiré. Dans ce cas, la procédure de détermination doit être effectuée jusqu'à l'obtention de la fonction objectif ciblée.

La seconde entité se base sur les valeurs optimales de la puissance, de l'avance, de l'Offset et de la hauteur de crête. Dans cette entité, la variable d'optimisation est le taux de recouvrement. Cette variable est déterminée grâce au modèle d'ordre 4, et permet d'obtenir un S_a situé entre 2 et $0,94 \pm 0,2 \mu\text{m}$.

Enfin, la troisième entité se base elle aussi sur les paramètres optimaux déterminés pour une hauteur de crête de $300 \mu\text{m}$, et intègre le paramètre du nombre de passes. Cette entité permet l'obtention d'un S_a de $0,5 \mu\text{m}$ selon une stratégie de six passes, dont la sixième est perpendiculaire à la cinquième pour une avance de $10\,000 \text{ mm/min}$.

Le protocole proposé ne permet pas toutefois de déterminer les valeurs opératoires pour des rugosités surfaciques situées entre $0,5$ et $0,94 \mu\text{m}$. Ceci étant causé par un manque de points expérimentaux. Dans ce cas, l'augmentation du nombre de passes pour une hauteur de crête de $60 \mu\text{m}$, est susceptible de pouvoir atteindre des valeurs de rugosités situées entre $0,5$ et $0,94 \mu\text{m}$.

Le macro-polissage laser a un impacte sur la rugosité mais aussi sur l'ondulation de la topographie initiale. Dans le cas d'une hauteur de crête de $300 \mu\text{m}$, l'augmentation du nombre de passes atténue l'ondulation des hauteurs de crête. Ainsi, une fois l'ondulation initiale éliminée, la sixième passe obtenue avec une plus faible densité d'énergie lisse la rugosité. Ce raisonnement peut être appliqué en vue d'obtenir les paramètres opératoires pour des rugosités situées entre $0,94$ et $0,5 \mu\text{m}$.

En effet, compte tenu des résultats obtenus, les paramètres optimaux déterminés pour un h_c de $60 \mu\text{m}$ permettent d'éliminer l'ondulation initiale. Suite à cette première passe optimale quant à l'ondulation, des passes supplémentaires à vitesse d'avance croissante seraient susceptibles de diminuer progressivement la rugosité, permettant ainsi d'atteindre des valeurs de S_a inférieures à $0,94 \mu\text{m}$.

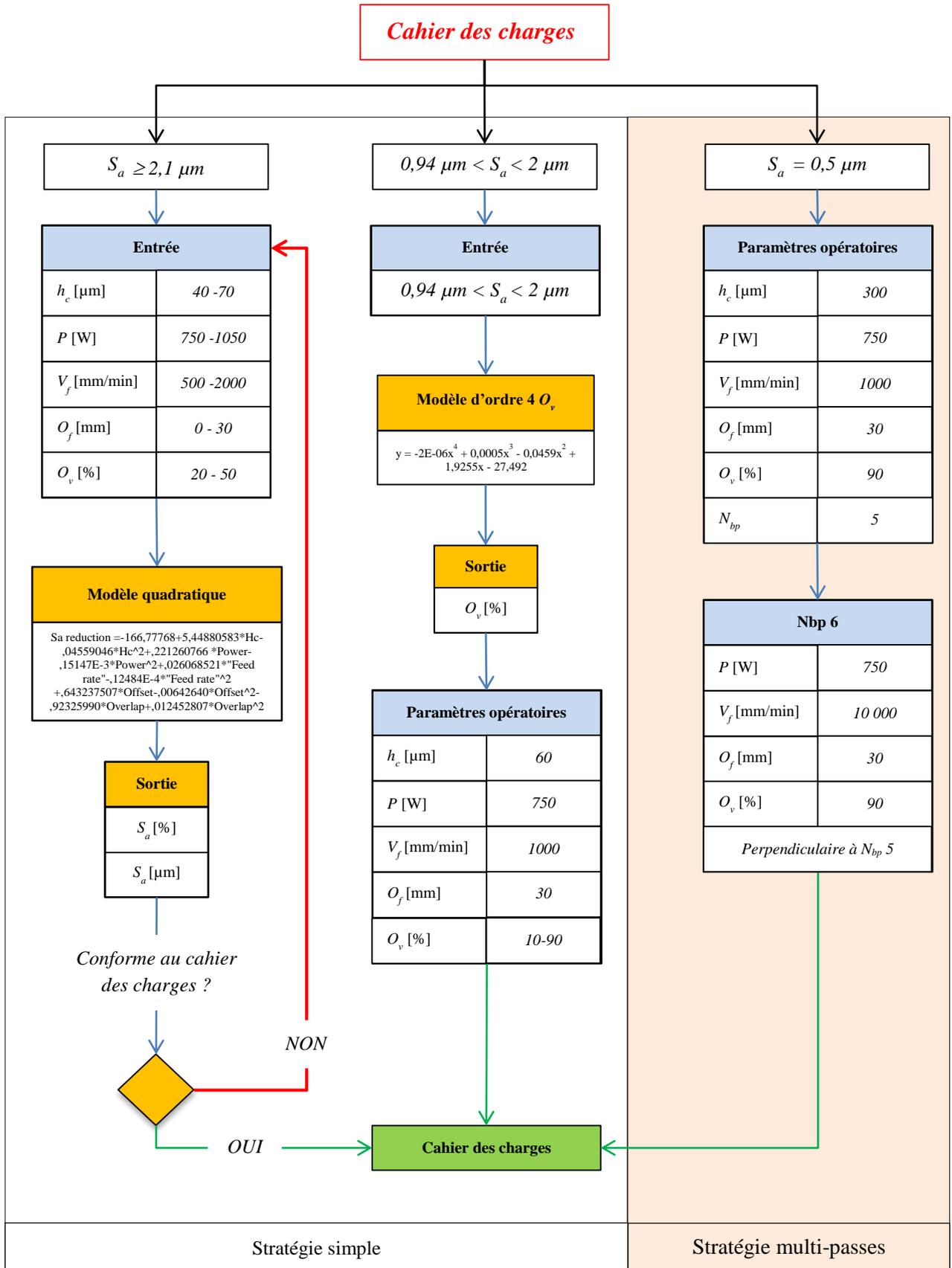


Figure 3.29: protocole de détermination des paramètres multi-procédés

3.9 Conclusion générale

D'un point de vue général et industriel, il est judicieux d'avoir une approche multi-procédés de la chaîne de fabrication, qui doit permettre de tirer profit de chaque technologie en vue d'obtenir la qualité finale tout en limitant les coûts. Dans cette optique, il est envisageable de discrétiser la pièce à traiter suivant les avantages des procédés concernant l'opération de finition.

Globalement, il convient d'employer le macro-polissage pour des surfaces difficilement accessibles et/ou de forme complexe, des matériaux difficilement usinables, des surfaces disposant d'une rugosité initiale relativement importante et en vue d'obtenir un S_a proche de $0,5 \mu\text{m}$.

Le procédé de polissage laser permet de limiter les opérations d'usinage et donc la consommation d'outils coupants, ce qui est non négligeable dans le cas d'une production de grande série. Les présents travaux confirment cette vision grâce à l'optimisation multi-procédés, qui permet de traiter des surfaces comportant une hauteur de crête située entre 40 et 300 μm . Le protocole proposé se situe dans ce cadre d'optimisation multi-procédés et permet de proposer des paramètres opératoires de polissage laser pour des surfaces initiales ébauchées tout en optimisant la topographie finale.

Le polissage laser admet des topographies initiales plus conséquentes, contrairement aux procédés conventionnels qui nécessitent une opération de semi finition, ce qui permet d'apporter un gain sur l'opération d'ébauche de la surface.

En matière d'optimisation topographique, le procédé de polissage laser dispose d'une très bonne efficacité. Les optimisations réalisées permettent d'obtenir des pourcentages de réduction allant de 85 à 99 %, pour des rugosités surfaciques finales de 0,94 et $0,5 \pm 0,2 \mu\text{m}$.

Parallèlement, en matière de fonctionnalité des surfaces, les procédés conventionnels permettent d'obtenir des rugosités finales plus faibles, de l'ordre de $0,01 \mu\text{m}$. Dans ce cas, l'utilisation couplée du macro et du micro-polissage peut être une alternative quant à l'optimisation globale de la chaîne et l'amélioration topographique. Autrement dit, le macro-polissage est un procédé de semi-finition, tandis que le micro-polissage est un procédé de finition. De plus, ce couplage permet de réaliser les deux opérations de semi-finition et finition sur une même machine. Le macro-polissage permet d'obtenir une rugosité surfacique suffisante pour beaucoup d'applications comme la biomécanique ou la fabrication de moules.

Physiquement, le polissage laser est un procédé thermodynamique. Grâce aux tensions de surfaces, le matériau en fusion s'étale ce qui engendre le lissage de la topographie. Ainsi, le temps de fonte est un paramètre primordial pour le polissage laser, et le taux de recouvrement ainsi que le nombre de passes permettent d'augmenter cette variable et donc d'optimiser le lissage. Le réglage des paramètres opératoires doit permettre de laisser le temps à la matière de s'écouler sans pour autant perturber la stabilité du bain de fusion, ce qui peut créer une dégradation de la surface par la création d'une ondulation résiduelle.

En termes de productivité, le procédé de polissage laser nécessite une optimisation concernant les temps de cycles, pouvant être améliorés par l'augmentation de l'avance et l'augmentation du diamètre de faisceau laser.

Chapitre 4 : polissage laser de pièces obtenues par fabrication directe

4.1	Introduction	67
4.2	Contexte et verrous scientifiques.....	67
4.3	Méthodologie d'investigation.....	68
4.4	Polissage laser de surfaces planes	68
4.4.1	Etude de faisabilité.....	69
4.4.1.1	Analyse de la topographie initiale	69
4.4.1.2	Problématiques après polissage laser	71
4.4.1.3	Analyse métallographique après polissage laser	72
4.4.2	Modélisation et optimisation.....	73
4.4.2.1	Optimisation de l'environnement gazeux.....	73
4.4.2.2	Modélisation et optimisation de l'avance	74
4.4.2.3	Modélisation et optimisation de l'Overlap	75
4.4.2.4	Modélisation et optimisation du nombre de passes	77
4.4.2.5	Modélisation et optimisation de l'Offset	80
4.4.2.6	Impact de la densité d'énergie	83
4.4.3	Applications	84
4.4.3.1	Polissage laser du TA6V	84
4.4.3.2	Polissage laser de pièce de forme complexe	85
4.4.4	Conclusion	86
4.5	Polissage laser de surfaces cylindriques	87
4.5.1	Modélisation et optimisation.....	88
4.5.1.1	Impact de la cellule de confinement	88
4.5.1.2	Modélisation et optimisation de l'avance	90
4.5.1.3	Modélisation et optimisation de la puissance	91
4.5.1.4	Modélisation et optimisation de l'Overlap	92
4.5.1.5	Modélisation et optimisation du nombre de passes	93
4.5.1.6	Impact du rayon de courbure	94
4.5.1.7	Analyse de la déformation géométrique	96
4.5.2	Conclusion	97
4.6	Conclusion générale	98

4.1 Introduction

La fabrication additive de pièces métalliques est un procédé innovant qui se compose de trois technologies majeures : par lit de poudres, par dépôt de fil fondu et par projection de poudres. Cette technologie permet la réalisation rapide de pièces de formes complexes, et grâce à l'apport localisé de la matière, il est possible de diminuer la masse des pièces par la création de sections minces. Vis-à-vis des deux autres technologies, la projection de poudre admet la création de gradients de matériaux, ce qui constitue un avantage pour certaines applications, comme le domaine biomédical ou l'aéronautique.

Cependant, dans certains cas, la qualité des pièces obtenues par fabrication additive peut s'avérer insuffisante. Dans une optique d'amélioration topographique, le polissage par laser peut être une solution intéressante. Ce procédé innovant peut de plus permettre d'apporter un gain quant à la productivité mais aussi en matière de faisabilité.

Concernant la faisabilité du polissage laser, l'utilisation d'une architecture 5 axes ou anthropomorphe permet de traiter les surfaces de formes complexes. Vis-à-vis de la technologie par lit de poudres, le polissage laser dispose de limitations concernant l'accessibilité des surfaces complexes. La technologie par lit de poudres n'étant généralement pas équipée des 4^{ème} et 5^{ème} axes, il est seulement possible d'accéder à des surfaces perpendiculaires au faisceau laser, ce qui limite l'accessibilité des surfaces et donc l'application du procédé de finition laser.

Quelques machines de polissage laser 5 axes apparaissent sur le marché des machines de production. Cependant, ces machines sont relativement chères et sont uniquement dédiées à l'opération de polissage. Certaines machines disposent en outre d'une cellule de confinement qui englobe le plateau, ce qui peut limiter les mouvements de la machine et donc l'accessibilité.

Au regard de la chaîne de fabrication, le procédé de polissage laser peut être intégré sur une machine hybride [Brevet WO2013079725], qui se compose de la technologie par projection de poudres et de l'usinage à grande vitesse. Dans cette configuration, l'utilisation alternée des procédés de polissage laser et de fabrication directe par projection de poudres entre chaque couche de matière permet de polir des surfaces difficiles d'accès. Ainsi, il est possible de traiter des surfaces intérieures, contrairement aux procédés d'enlèvement de matière qui ne peuvent accéder à ce type de surfaces. De plus, cette technologie hybride est susceptible d'apporter un gain de productivité, de par l'élimination de l'utilisation d'une machine dédiée à la finition et la diminution des temps de montage et démontage.

4.2 Contexte et verrous scientifiques

Au regard de l'état de l'art concernant la limitation fonctionnelle des surfaces, la majeure partie des études se focalisent sur le polissage laser de surfaces obtenues par lit de poudres, et très peu analysent la technologie par projection, ce qui limite son industrialisation.

Ces travaux de thèse se positionnent dans un contexte de fabrication de pièces de formes complexes et de section minces, qui constituent les avantages de la fabrication additive au sens large. Compte tenu des avantages de la technologie par projection de poudres, que ce soit en matière d'accessibilité grâce à l'utilisation d'une architecture 5 axes hybride, de productivité, le polissage laser est investigué vis-à-vis de cette technologie de fabrication directe.

4.3 Méthodologie d'investigation

La méthodologie d'investigation s'appuie sur une approche expérimentale et se divise en deux parties distinctes et complémentaires. La première partie se focalise sur le polissage laser de surfaces planes, tandis que la seconde s'articule autour du polissage laser de surfaces cylindriques.

La première partie s'appuie sur une étape de faisabilité, qui permet d'appréhender les paramètres opératoires vis-à-vis de la rugosité surfacique, de l'intégrité et de la déformation géométrique. Suite à ces essais, des modèles statistiques seront proposés en vue d'étudier le comportement des paramètres opératoires.

La seconde partie se positionne plus précisément dans un contexte de polissage laser de pièces de formes complexes et de section mince, par la prise en compte de la courbure de la pièce et l'analyse des phénomènes de déformation vis-à-vis des paramètres opératoires. Cette seconde partie permettra de construire d'autres modèles comportementaux.

La machine utilisée lors des expérimentations est celle de l'IRCCyN, qui est une MOCN 5 axes hybride (Figure 4.1). Cette machine hybride est composée d'un laser continu, fibré d'une longueur d'onde de 1070 nm et d'une puissance max de 4 kW ainsi que d'une broche de parachèvement. La machine dispose de deux buses : une micro-buse d'une puissance max de 800 W et une macro-buse d'une puissance max de 4000 W. L'utilisation de deux buses différentes permet une polyvalence de fabrication concernant la taille des pièces, leurs sections et la productivité.



Figure 4.1: machine hybride utilisée lors des expérimentations de polissage et de fabrication additive

4.4 Polissage laser de surfaces planes

Lors de la fabrication d'une pièce par projection de poudres, diverses stratégies de fabrication sont envisageables. Généralement, il est possible de réaliser une surface suivant une stratégie horizontale ou verticale. Dans le cas de la stratégie horizontale, la buse de projection est perpendiculaire à la surface fabriquée, tandis que dans le cas d'une stratégie verticale la buse est dans le même plan. La stratégie verticale permet la réalisation de murs et donc de pièces de formes complexes. Compte tenu du contexte de l'étude, qui se focalise sur la réalisation de surfaces complexes, la stratégie verticale est utilisée pour la réalisation de la topographie initiale (Figure 4.2). Les échantillons disposent d'une section de 0,8 mm, qui est la section minimale réalisable par la buse de projection utilisée.

Le procédé de fabrication directe dispose d'un domaine de faisabilité relativement restreint, ce qui se traduit par de faibles possibilités de réglages des paramètres opératoires lors de la création de murs. Afin de garantir la réalisation de la topographie initiale, les paramètres du procédé primaire seront fixes durant l'étude.

Les paramètres opératoires du procédé de polissage laser étudiés dans cette étude de faisabilité, sont la puissance (P) [W], l'avance (V_f) [mm/min] et le taux de recouvrement de passes (O_v) [%]. L'offset (O_f) [mm] n'est pas pris en compte dans cette démarche de faisabilité, il est donc fixé à 0, c'est-à-dire au point focal du laser.

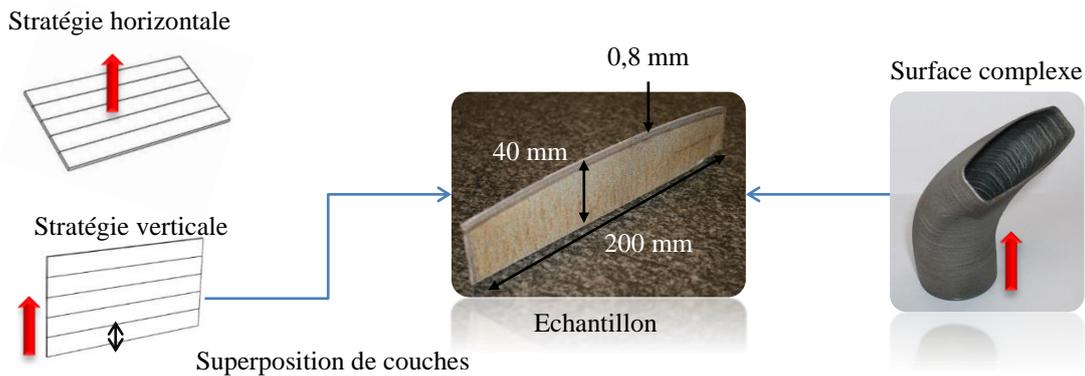


Figure 4.2: stratégie de fabrication primaire utilisée lors de l'étude de faisabilité

4.4.1 Etude de faisabilité

4.4.1.1 Analyse de la topographie initiale

La topographie initiale obtenue par projection de poudre est très différente d'une topographie obtenue par fraisage. En effet, la topographie est composée de deux textures différentes (Figure 4.3), dépendantes du principe du procédé.

Dans un premier temps, on remarque une texture directionnelle, causée par la superposition des couches de matière. Les caractéristiques de cette texture sont fonction du pas de superposition de couche (h) [mm] et des paramètres procédé tel que la puissance (P) [W], l'avance (V_f) [mm/min] et le débit de poudre (Q_m) [g/s]. La seconde texture est quant à elle chaotique et est fonction de la distribution de la projection de poudre. Cette texturation aléatoire est due à la poudre projetée, qui est partiellement fondue en surface. La poudre partiellement fondue a tendance à créer des agrégats de matière en surface, et donner ainsi une texture désordonnée et variable, en fréquence et en amplitude.

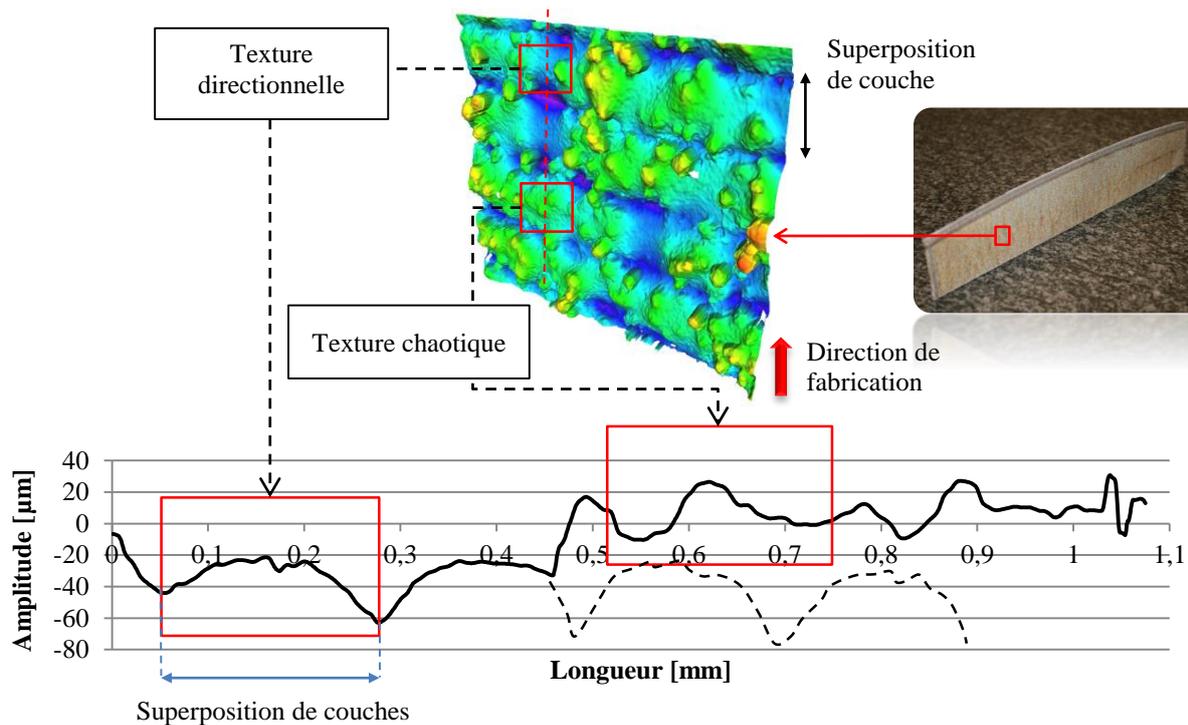


Figure 4.3: topographie et profil de surface obtenue par projection de poudres

La topographie initiale est dépendante des paramètres opératoires du procédé de fabrication directe, et est aussi fonction de la direction de fabrication et donc de la géométrie de la pièce. En effet, dans le cas d'une pièce de forme complexe, l'orientation de la buse de projection par rapport à la surface diffère selon la géométrie à obtenir. Cette orientation de fabrication, influence les deux textures qui composent la topographie de la surface. Dans le cas présenté (Figure 4.4), la topographie de la courbure externe dispose d'un pas de superposition plus important que la topographie de surface interne. Ce phénomène est directement lié à l'inclinaison de l'axe C ou de la pièce par rapport à la buse lors de la fabrication. Concernant la texture chaotique, celle-ci est plus dense sur la topographie externe et moins prononcée sur la topographie interne. La texture chaotique est dépendante de l'angle d'orientation de la buse par rapport à la surface.

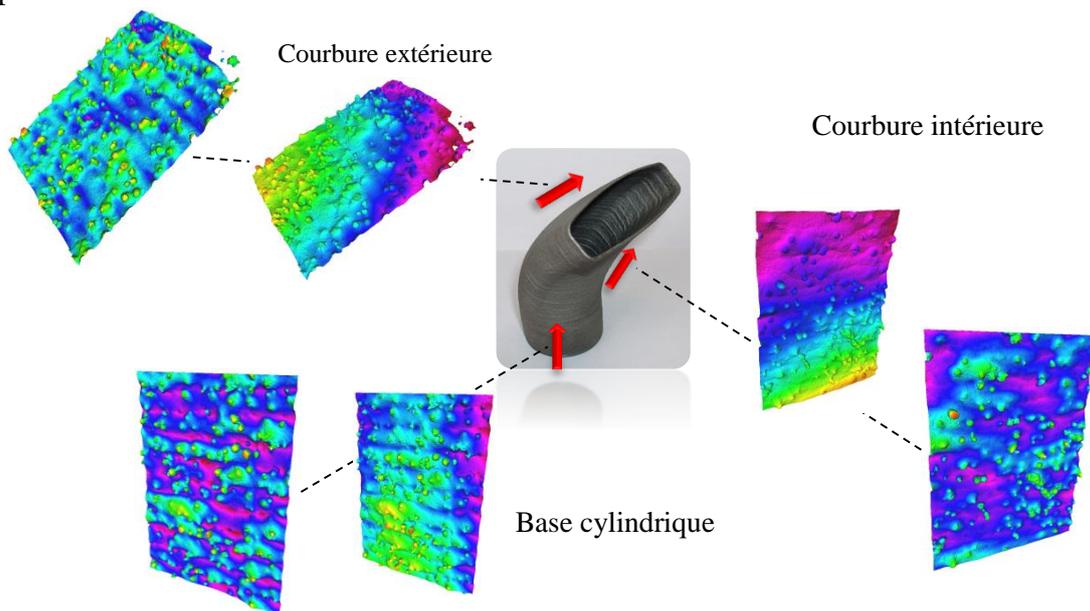


Figure 4.4: topographies d'une surface complexe suivant la direction de fabrication

4.4.1.2 Problématiques après polissage laser

L'étude de faisabilité permet de déterminer expérimentalement les paramètres de polissage laser jugés efficaces, vis-à-vis du lissage de la topographie. Aussi, compte tenu de la faible section des échantillons, il est question d'aborder la problématique de déformation de la surface après polissage laser. Cette campagne expérimentale de faisabilité permet de déterminer les paramètres efficaces du polissage laser pour le lissage de la surface :

- Puissance (P) = 210 W
- Avance (V_f) = 3000 mm/min
- Overlap (O_v) = 60 %

Les paramètres retenus permettent d'obtenir une rugosité surfacique finale de $1,9 \mu\text{m}$ pour une rugosité initiale de $21 \mu\text{m}$ amenant à une réduction de 91%. Cependant, après polissage laser, certains défauts sont présents comme une topographie finale non optimisée (Figure 4.5a), une déformation de la surface (Figure 4.5b) et des problèmes d'intégrité de surface (Figure 4.5c).

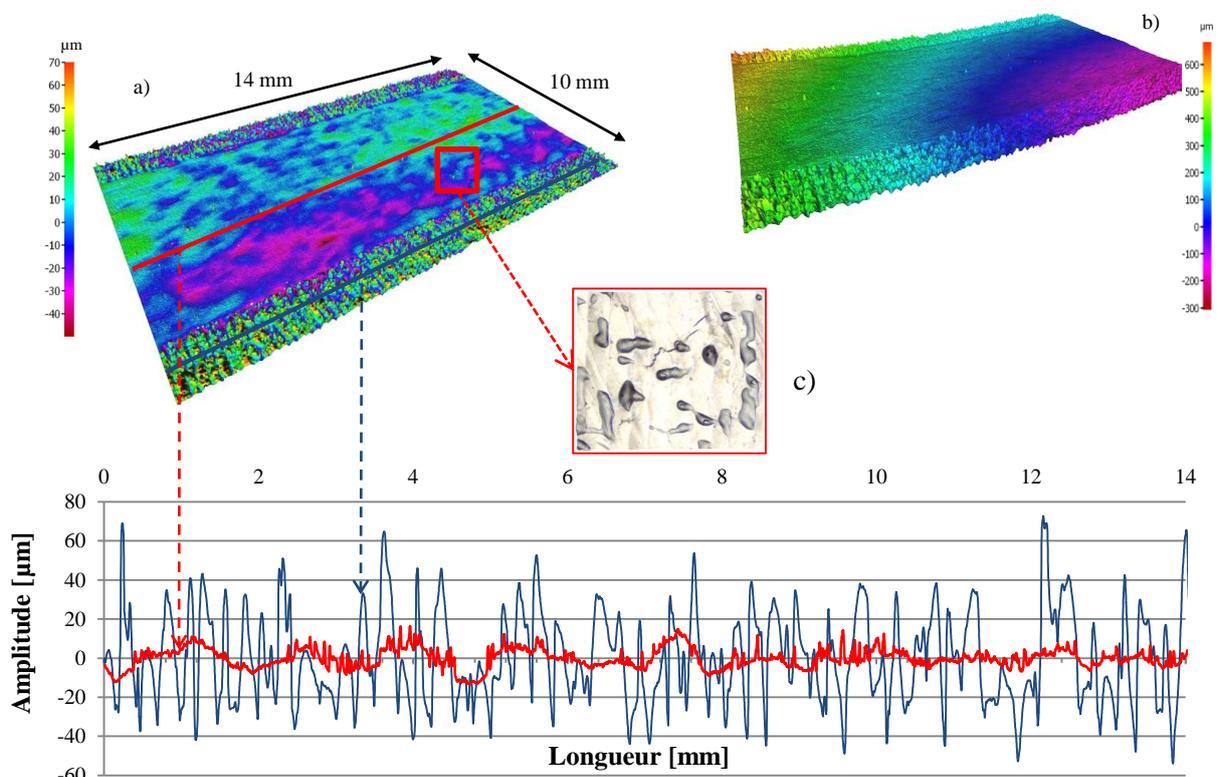


Figure 4.5: topographies polie et initiale et défauts après polissage

Comme pour les surfaces usinées polies par laser, une topographie non optimale se caractérise par la présence de la fréquence initiale après passage du laser. Dans le cas étudié, la fréquence de la topographie finale est régulière et quasi-similaire à l'ondulation du pas de superposition des couches de la topographie initiale. Le résultat n'est donc pas optimal.

La déformation de la surface est causée par une densité d'énergie appliquée excessive, qui a tendance à déformer la section mince. Ce constat implique qu'il est nécessaire d'adapter les paramètres opératoires en fonction de la topologie de la pièce à traiter.

La surface finale est composée de microfissures et de gouttes de matière. Ces problèmes d'intégrité peuvent provenir de différents facteurs, comme le matériau, la chaleur transmise ou encore l'environnement gazeux.

L'étape suivante consiste à comprendre les sources des problématiques déterminées et d'optimiser les paramètres en vue de les éliminer.

4.4.1.3 Analyse métallographique après polissage laser

Cette étape d'analyse consiste à étudier la composition des gouttes de matière afin d'en déterminer les sources. Pour ce faire, un microscope à balayage électronique (MEB) a été employé (Figure 4.6). Cette technologie permet d'analyser les topographies des surfaces, mais aussi de contrôler la composition des matériaux par rayons X.



Figure 4.6: Microscope à Balayage Electronique (MEB)

Le défaut de matériau est majoritairement composé d'oxygène et de silice (Figure 4.7). La présence d'oxygène laisse supposer que la provenance de ce composant est directement liée à un défaut de protection gazeuse lors du polissage laser ou de la fabrication directe. La silice, quant à elle, est présente dans la poudre de 316L utilisée pour la fabrication additive (Tableau 4.1). En contact avec l'oxygène, la silice se transforme en oxyde de silice sous forme de gouttes transparentes.

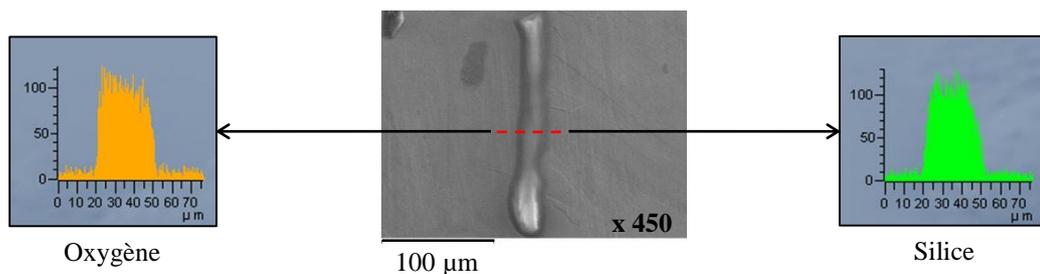


Figure 4.7: composition du défaut de matériau après polissage laser

<i>Composants</i>	Si	C	Mo	Ni	Mn	Cr
%	0.8	0.02	2.5	12.2	1.4	17.3

Tableau 4.1 : composition de la poudre de 316L utilisée lors de la fabrication directe

4.4.2 Modélisation et optimisation

4.4.2.1 Optimisation de l'environnement gazeux

En vue de maîtriser l'environnement gazeux et donc d'éliminer l'oxyde de silice, une cellule de confinement a été réalisée. La cellule a été utilisée en complément de la protection gazeuse effectuée par la buse de la machine, et cela pour les opérations de fabrication additive et de polissage laser (Figure 4.8).

Lors de la fabrication directe, la stratégie de fabrication a un impact sur la protection gazeuse. Pour une stratégie plane, l'argon est projeté sur l'ensemble du bain de fusion, tandis que pour une stratégie de fabrication verticale, le bain de fusion n'est pas entièrement protégé, ce qui accroît le risque d'oxydation.



Figure 4.8: cellule de confinement réalisée pour les expérimentations

L'oxydation de la surface est mise en avant par sa couleur. Une bonne protection donne une surface brillante, tandis qu'une mauvaise protection a tendance à créer une surface marron voire jaunâtre (Figure 4.9).

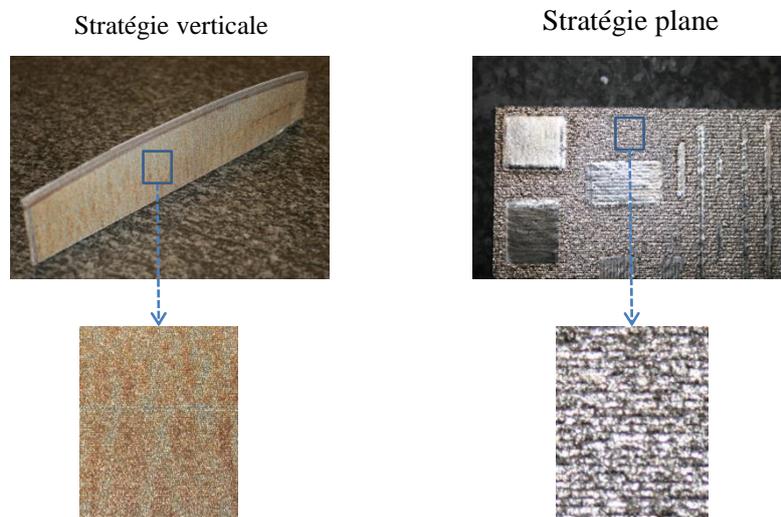


Figure 4.9: oxydation de la surface suivant la stratégie de fabrication

Afin de vérifier l'impact de la cellule de confinement sur l'oxyde de silice, deux tests ont été réalisés. Lors du premier test, la protection gazeuse est seulement effectuée à travers la buse de projection. Pour le deuxième test, la protection gazeuse est garantie à travers la buse plus la cellule de confinement. Après expérimentation, il s'avère que la cellule de confinement tend à diminuer la concentration d'oxyde de silice lors de la fabrication directe, ce qui améliore l'intégrité de surface après polissage laser, par une diminution des défauts de matériau (Figure 4.10). Après passage du laser, l'oxyde de silice est répartie suivant la direction d'avance du

faisceau. L'oxyde a tendance à se propager sur les bords du faisceau, donnant ainsi une texturation directionnelle.

Ces résultats montrent que l'intégrité de la surface finale est dépendante de la surface initiale et que le procédé de polissage laser doit être optimisé en fonction du procédé primaire.

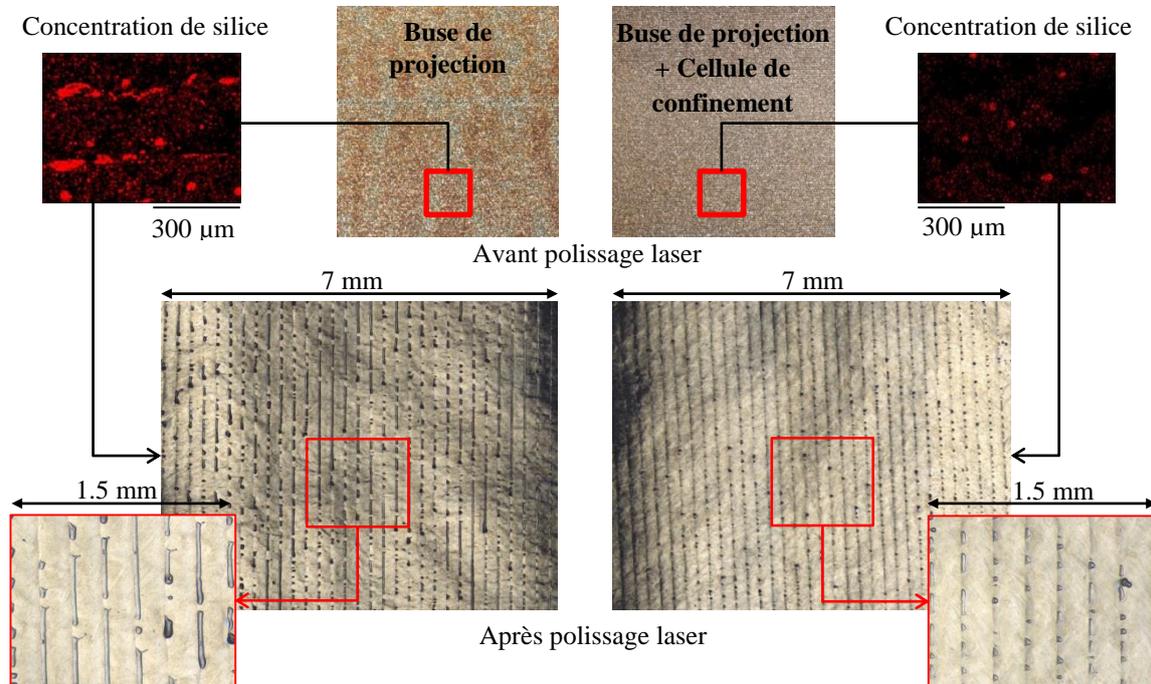


Figure 4.10: impact de la cellule de confinement sur l'intégrité avant et après polissage laser

4.4.2.2 Modélisation et optimisation de l'avance

Afin de comprendre l'impact des paramètres opératoires, il est pertinent d'effectuer une analyse multi-échelles des topographies. Une surface dispose d'une multitude de composantes fréquentielles qui peuvent être étudiées grâce aux filtres de coupures. Le filtre de coupure, appelé « cut-off », permet d'isoler les composantes d'ondulation et de rugosité. Cette étape de filtrage permet d'évaluer l'impact global du procédé de polissage laser sur la topographie finale. Un filtre de coupure (L_c ou λ_c) de 8000 μm permet d'étudier l'ondulation de la surface, tandis qu'un filtre de 800 μm permet d'analyser la rugosité. Le filtre de 2500 μm est intermédiaire, et l'utilisation de ces trois filtres permet d'avoir un regard global sur l'évolution topographique engendrée par le procédé.

L'analyse multi-échelles (Figure 4.11) montre un comportement différent de l'avance sur l'ondulation et la rugosité. Dans le cas de la rugosité, le comportement de l'avance est quasi-linéaire tandis que pour l'ondulation celui-ci dispose d'une plus grande variation. Autrement dit, l'avance est un paramètre qui influence essentiellement les composantes d'ondulation.

Les modèles de régressions proposés disposent d'une bonne robustesse concernant les deux filtres de coupure. Le point optimal du paramètre, en termes de rugosité surfacique, se situe à 3500 mm/min et ce pour les deux échelles d'observation.

Cependant, après analyse des surfaces, il s'avère que l'avance influe aussi sur l'intégrité (Figure 4.12). En effet, l'augmentation de l'avance a tendance à créer de la fissuration pour des vitesses allant de 1000 à 2000 mm/min et pour des vitesses situées entre 3500 et 6000. Pour une avance de 3000 mm/min, aucune fissure n'est présente. Ce comportement reste identique même pour une répétition des essais à une vitesse de 3000 mm/min, où aucune fissure n'est présente.

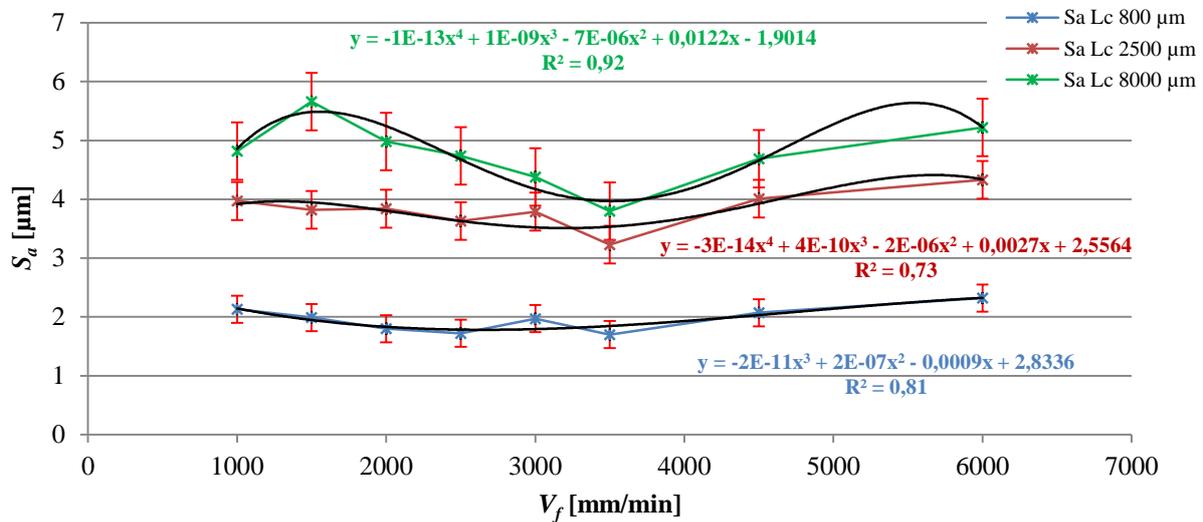


Figure 4.11: impact de l'avance sur le S_a calculé suivant une analyse multi-échelles

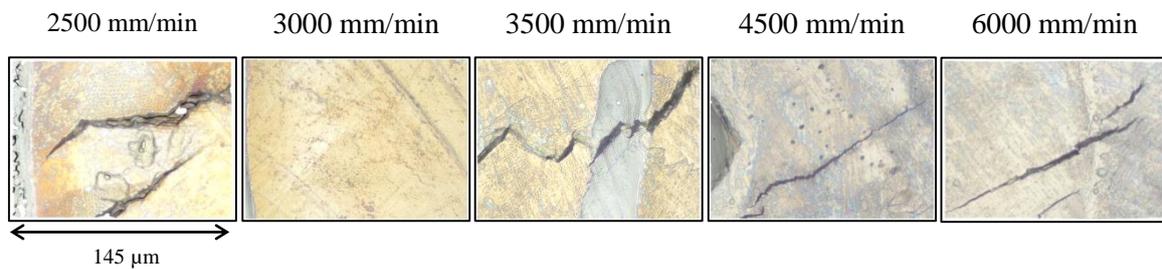


Figure 4.12: fissuration en fonction de l'avance

4.4.2.3 Modélisation et optimisation de l'Overlap

Le taux de recouvrement de passe permet d'optimiser la surface finale quand la puissance et l'avance atteignent leurs limites. Globalement, l'analyse multi-échelle montre que l'augmentation du taux de recouvrement a tendance à diminuer la rugosité surfacique et l'ondulation (Figure 4.13).

La modélisation multi-échelles met en avant un comportement similaire du taux de recouvrement sur les trois filtres de rugosité. Cependant, l'analyse montre une forte réduction de S_a entre des Overlap de 10 et 20 % concernant l'ondulation, ce qui implique qu'un taux de recouvrement de 10 % a peu d'impact sur cette composante. Le comportement de l'Overlap est plus stable à plus petite échelle topographique, et dispose d'une plus grande amplitude de variation concernant l'ondulation.

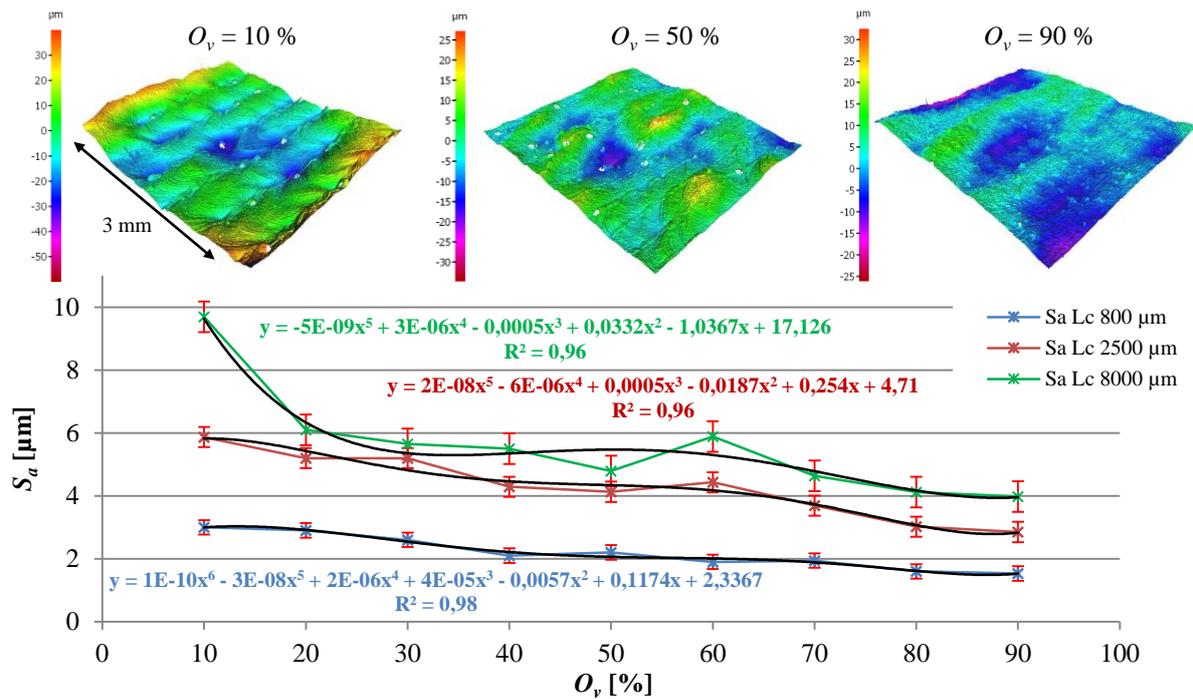


Figure 4.13: modélisation multi-échelles du comportement de l'Overlap

Le taux de recouvrement de passe influence aussi l'intégrité de surface et plus particulièrement la fissuration (Figure 4.14). En effet, on remarque la présence de microfissures à partir d'un Overlap de 60%. Ce phénomène peut être causé par la chaleur superficielle excessive, apportée par des taux de recouvrement trop importants. En conclusion, un Overlap de 60 % est optimal quant à l'intégrité et la rugosité surfacique.

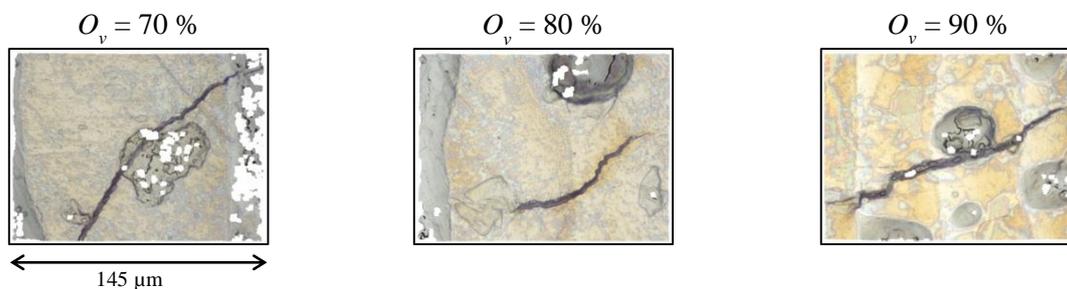


Figure 4.14: microfissures engendrées par des taux de recouvrement de 70 ; 80 et 90%

Le taux de recouvrement de passe est un paramètre opératoire répétable et robuste vis-à-vis de l'optimisation de la rugosité surfacique (Figure 4.15). Avec des conditions optimales des paramètres opératoires vis-à-vis de topographies obtenues suivant deux procédés primaires, le comportement du paramètre est identique. Dans ce cas, le S_a initial de la surface usinée est de 13,6 μm pour un S_a initial de 21 μm pour la surface obtenue par projection de poudres.

Dans un premier temps, ce constat implique qu'il est possible d'optimiser simplement la topographie initiale grâce à une augmentation du taux de recouvrement. Dans un second temps, ces résultats montrent que le taux de recouvrement, suivant les valeurs étudiées des paramètres, à un certain impact hiérarchique sur la rugosité surfacique vis-à-vis de la puissance, l'avance et l'Offset.

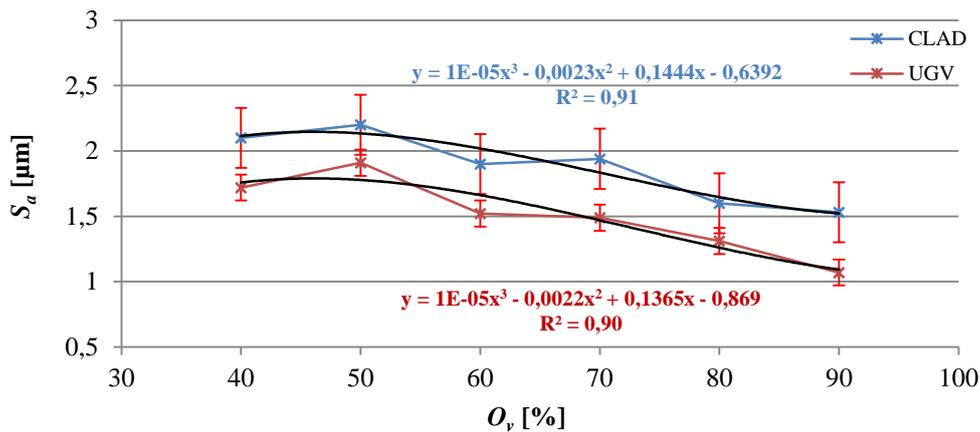


Figure 4.15: comportement du taux de recouvrement selon des paramètres opératoires et une topographie initiale différents

4.4.2.4 Modélisation et optimisation du nombre de passes

Le paramètre du nombre de passes intervient suite à l'optimisation des paramètres de puissance, d'avance et de taux de recouvrement. Ce type de stratégie permet d'augmenter le temps d'interaction entre le laser et la surface, en vue d'optimiser le lissage, et sans augmentation de la densité d'énergie qui serait susceptible de limiter la déformation. Le temps d'interaction entre le laser et la surface est une variable primordiale du polissage laser. Afin de fondre des volumes de matière plus conséquents, il est nécessaire d'augmenter le temps d'interaction, pour laisser le temps à la matière de s'écouler. Ce paramètre se positionne donc hiérarchiquement après le taux de recouvrement de passe.

Après application de cinq passes, l'opération de polissage permet d'obtenir un S_a de 0,8 μm , et une réduction de S_a de 96 % (Figure 4.16) pour un filtre de coupure de 800 μm .

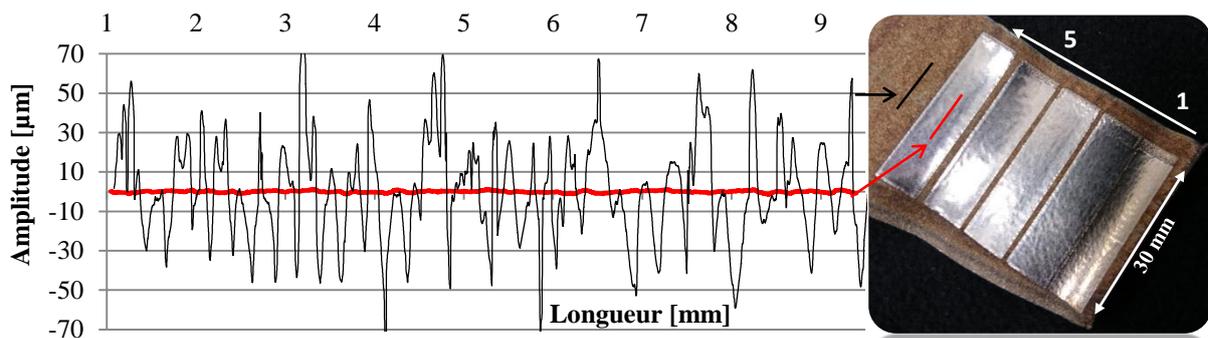


Figure 4.16: profil de rugosité avant et après polissage suivant une stratégie de 5 passes

L'analyse multi-échelles (Figure 4.17) montre une différence de comportement du paramètre de nombre de passes selon les filtres de coupures. Dans un premier temps, l'analyse met en avant une forte réduction du S_a entre la première et la seconde passe, et cela pour l'ensemble des filtres de coupure. Concernant l'ondulation au-delà de la troisième passe, le S_a est augmenté tandis que pour le filtre de 2500 μm , le S_a a tendance à se stabiliser. Enfin, pour la microrugosité, l'augmentation du nombre de passes au-delà de deux n'a pas d'impact.

Le paramètre de nombre de passes influence principalement l'ondulation de la topographie et peu la microrugosité. Au final, un nombre de passes égal à deux est la valeur optimale quant à la rugosité, l'ondulation et la productivité.

Les modèles de régression d'ordre trois ont une très bonne corrélation avec les valeurs expérimentales et permettent de prédire le S_a en fonction du nombre de passes.

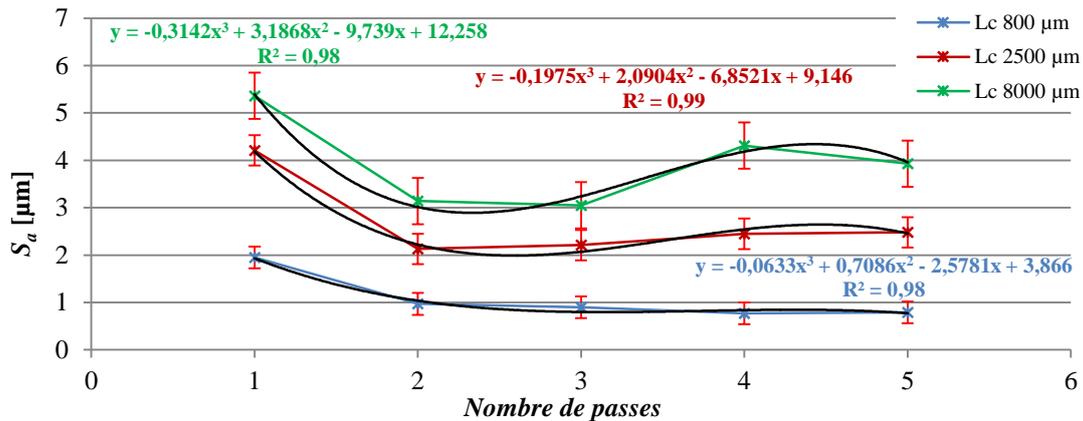


Figure 4.17: modélisation multi-échelles du comportement du nombre de passes

Le polissage laser engendre une texturation particulière de la surface de type « peau d'orange » (Figure 4.18) quantifiée par un filtre de coupure de 8000 µm. Cette texturation n'est pas quantifiable avec des filtres de coupure de 800 µm, c'est pourquoi l'analyse multi-échelle est pertinente. L'analyse visuelle de la topographie montre cependant une limitation de la diminution de l'amplitude et une variation de la fréquence spatiale de la surface (Figure 4.19). La rugosité surfacique permet de caractériser l'amplitude de la surface mais pas sa répartition spatiale. Afin de caractériser l'évolution spatiale de la topographie, le paramètre W_{sm} est retenu.

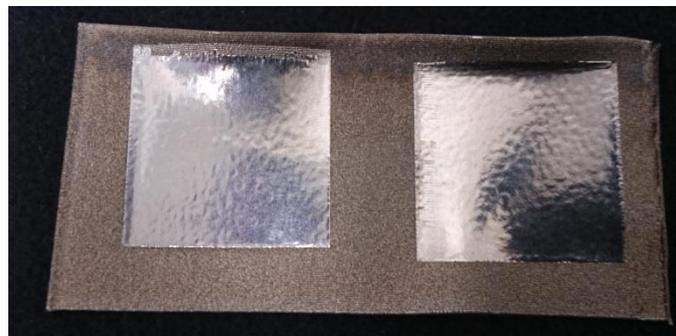


Figure 4.18: texture peau d'orange engendrée par le polissage laser

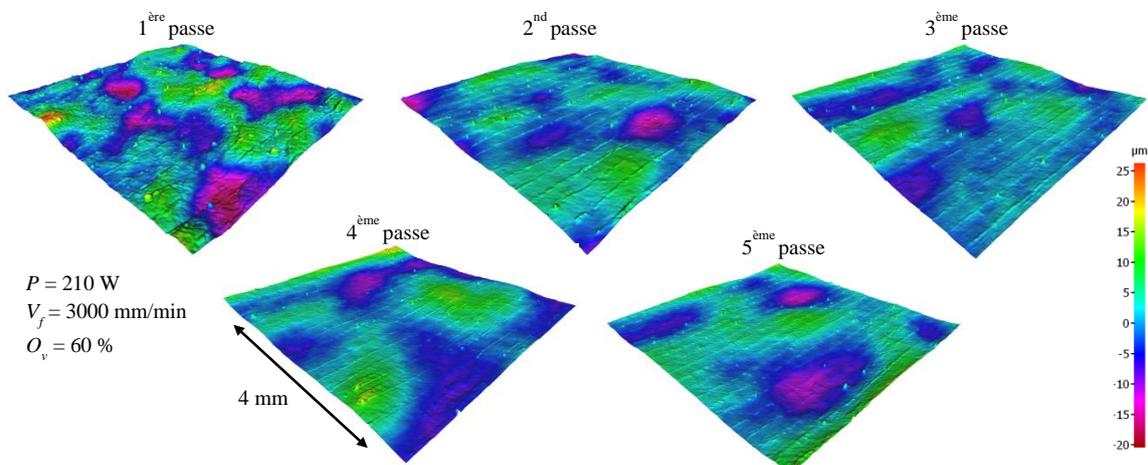


Figure 4.19: évolution de la topographie en fonction du nombre de passes

Le paramètre W_{sm} quantifie l'espacement moyen des éléments du profil d'ondulation (Eq.4.1). Selon l'analyse visuelle, l'augmentation du nombre de passes tend à augmenter le W_{sm} (Figure 4.20). La première passe n'a pas d'impact sur la fréquence spatiale tandis que les passes supérieures ont tendance à augmenter le W_{sm} .

$$W_{sm} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{si} \quad \text{Eq.4.1}$$

Grâce à une régression d'ordre 3 entre les données, il est possible de mettre en place un modèle pour prédire le nombre de passes en fonction du paramètre W_{sm} désiré. Le modèle construit est corrélé à 100 % avec les valeurs expérimentales.

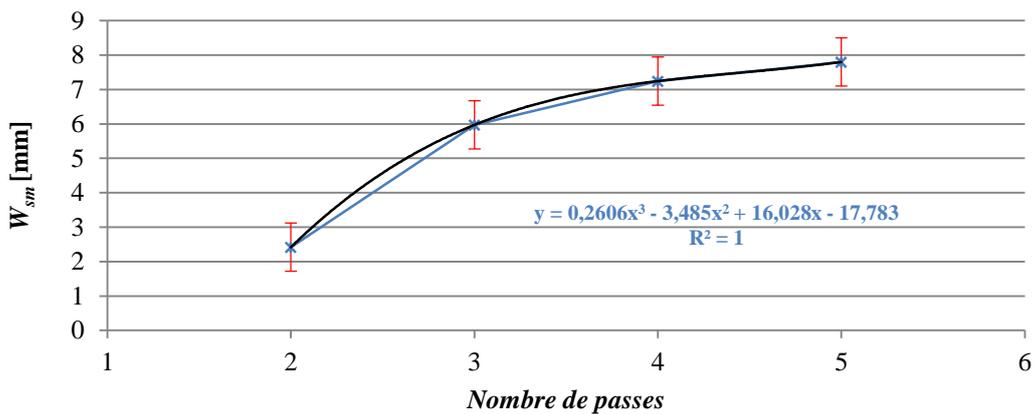


Figure 4.20: évolution du paramètre W_{sm} suivant l'augmentation du nombre de passes

L'augmentation du nombre de passes tend à lisser la topographie et à diminuer la texture de type peau d'orange. Cependant, cette dernière persiste et peut être une limitation quant à la fonctionnalité de la surface finale. Cette problématique est causée par la topographie initiale qui dispose de volumes de pics et de cavités hétérogènes, ce qui engendre une texturation désordonnée et ondulée.

Au niveau de l'intégrité de surface, le nombre de passes a une influence sur la présence d'oxyde de silice. En effet, les essais montrent qu'une augmentation du nombre de passes tend à diminuer la présence d'oxyde de silice (Figure 4.21). L'oxyde de silice est diminué et sa texturation devient plus directionnelle vis-à-vis de la direction du laser.

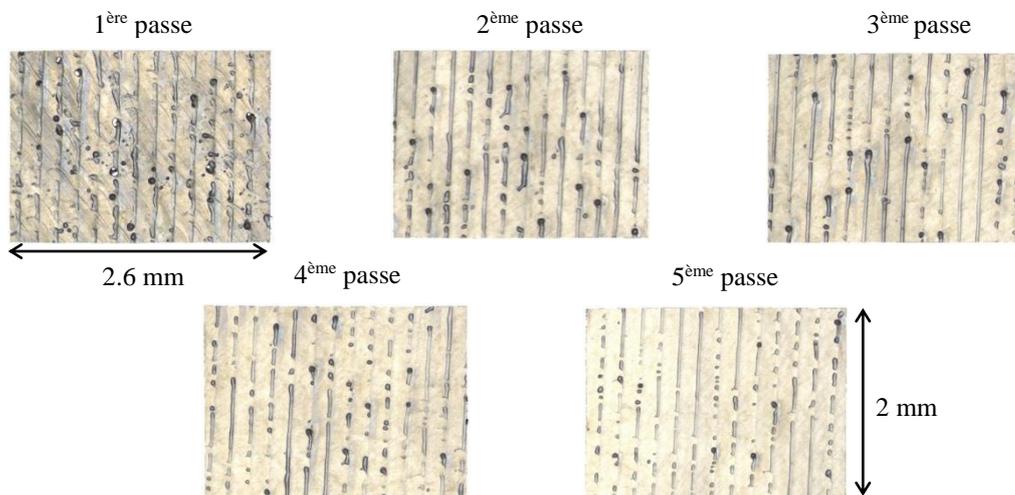


Figure 4.21: amélioration de l'intégrité de surface suivant une stratégie multi-passes

Suite à cette stratégie, aucune microfissure n'est présente. Seule une structure étagée est induite par le procédé (Figure 4.22).

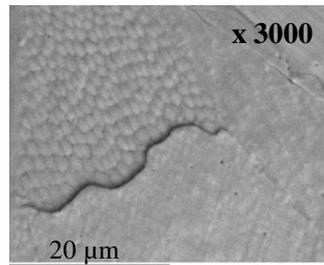


Figure 4.22: structure étagée après une stratégie multi-passes

4.4.2.5 Modélisation et optimisation de l'Offset

L'augmentation de l'Offset peut être une solution quant à l'accessibilité. En effet, lors du polissage de certaines surfaces, il est nécessaire d'augmenter la distance focale du faisceau en vue de traiter les zones difficilement accessibles (Figure 4.23). Cependant, toujours dans un contexte de polissage laser de pièces de formes complexes, la cellule de confinement a tendance à limiter les mouvements de la machine. Pour cette raison, l'Offset est étudié sans utilisation de la cellule de confinement.

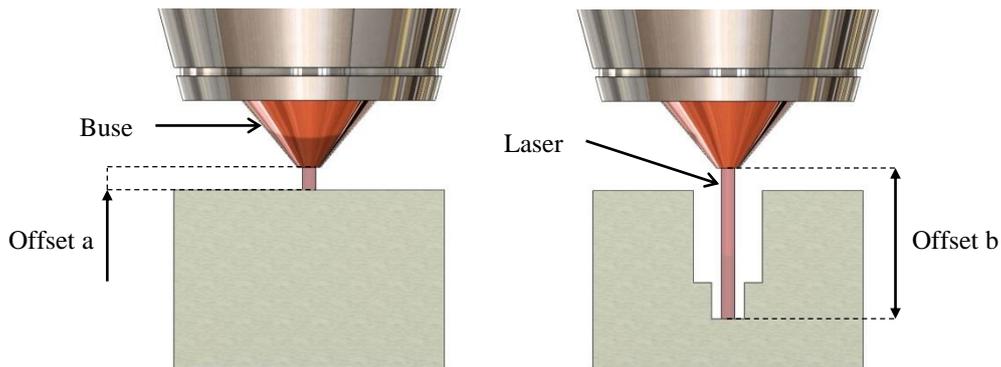


Figure 4.23: variation de l'Offset vis-à-vis de l'accessibilité de la surface

Une variation de distance focale implique une variation de la distribution de la densité d'énergie (Figure 4.24). Au point focal du faisceau, la distribution de la densité d'énergie est de type « top hat », tandis que pour un Offset de 12 mm, la distribution est de type Gaussienne. Autrement dit, l'augmentation de l'Offset a tendance à augmenter l'aplatissement de la distribution gaussienne, ce qui a un impact sur la texturation de la surface (Figure 4.25).

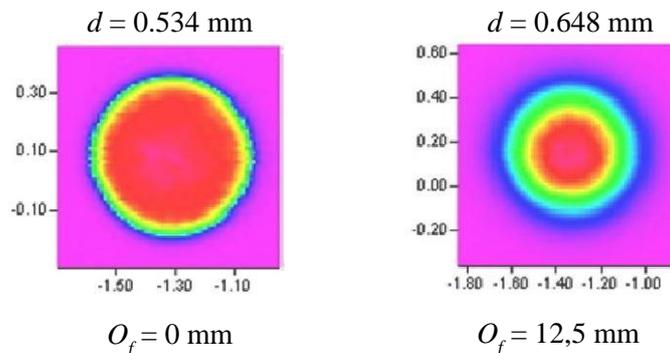


Figure 4.24: répartition de la densité d'énergie selon l'Offset

Pour de faibles Offset, la texture de la topographie initiale est prépondérante. Avec l'augmentation de l'offset, la prépondérance des textures s'inverse. Dans ce cas, la texture due au polissage laser est dominante, et l'offset tend à texturer directionnellement la surface sans pour autant éliminer l'ondulation initiale. Ce phénomène est causé par la distribution de densité d'énergie du faisceau gaussien, qui a tendance à fondre davantage de matière au centre du faisceau laser que sur les bords, mais aussi à cause du taux de recouvrement de passe qui est corrélé avec la distribution de densité d'énergie. Un fort aplatissement de la densité d'énergie Gaussienne nécessite des taux de recouvrement plus importants, afin d'augmenter le faible lissage engendré sur les bords du faisceau.

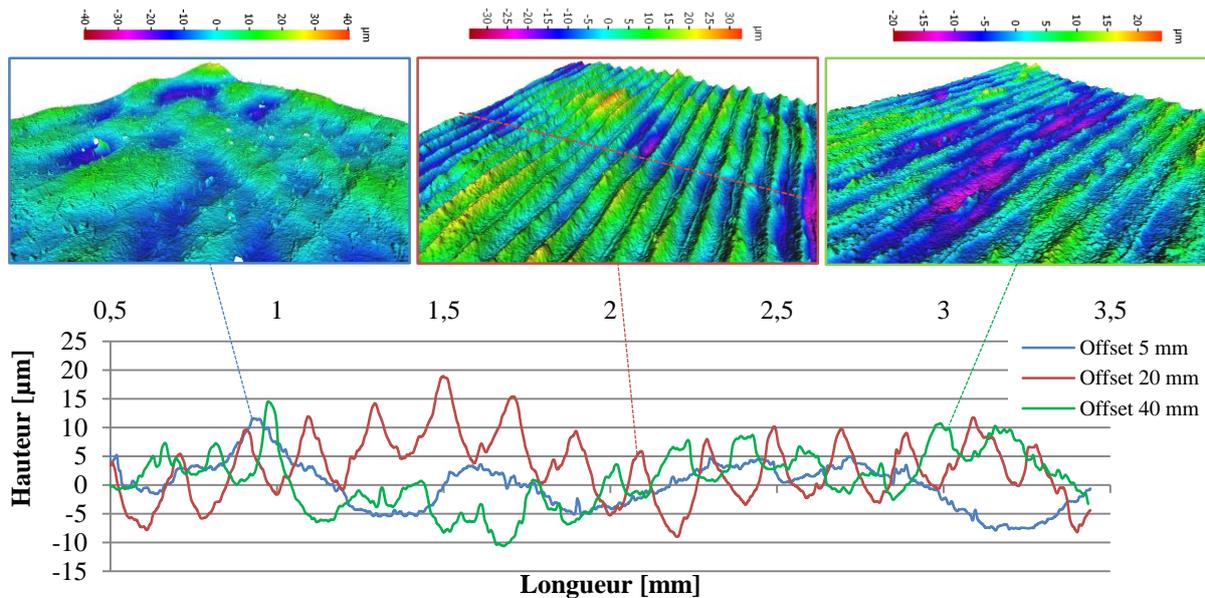


Figure 4.25: évolution de la texture de la surface en fonction de l'augmentation de l'Offset

L'Offset dispose d'un comportement identique sur le S_a pour des valeurs situées entre 20 et 40 mm (Figure 4.26) et ce pour les trois filtres de coupure. Une rugosité surfacique maximale est obtenue pour un offset situé entre 15 et 20 mm pour chaque filtre.

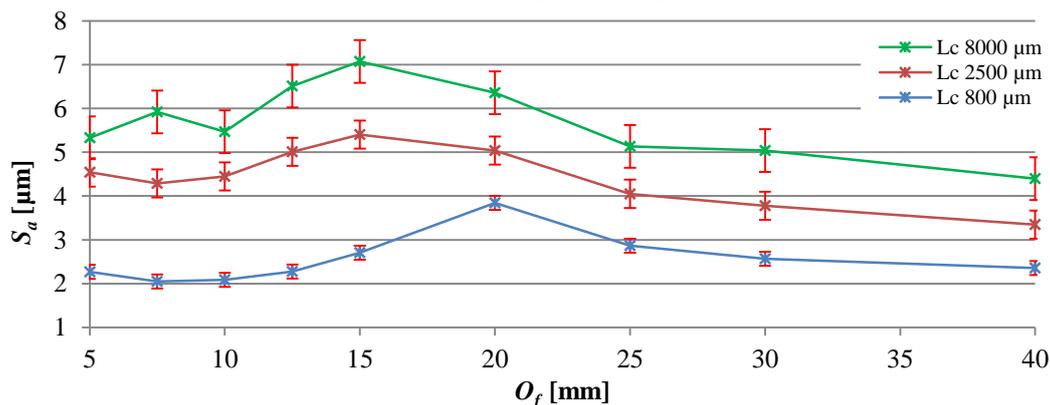


Figure 4.26: impact de l'offset sur le S_a suivant une analyse multi-échelles

Compte tenu du comportement de ce paramètre, il semble judicieux de proposer une modélisation en deux parties : un modèle portant sur des valeurs d'Offset situées entre 5 et 20 mm (Figure 4.27) et un autre pour des valeurs comprises entre 20 et 40 mm (Figure 4.28).

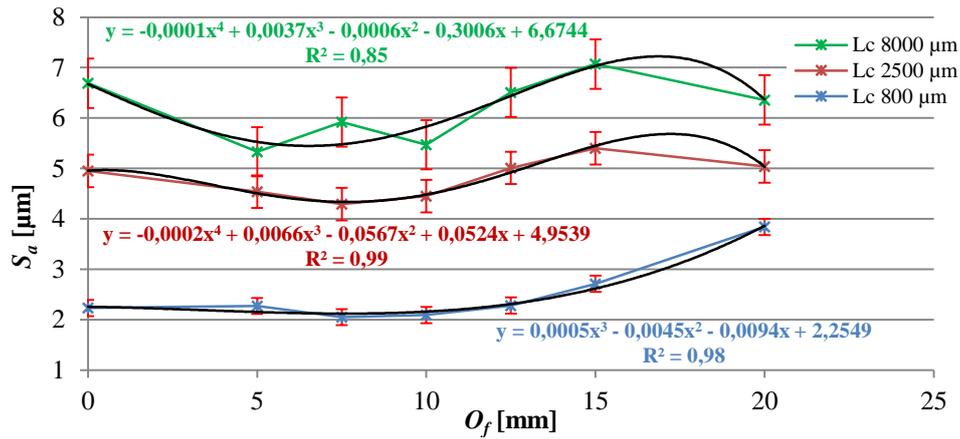


Figure 4.27: modélisation multi-échelles de l'Offset pour des valeurs situées entre 5 et 20 mm

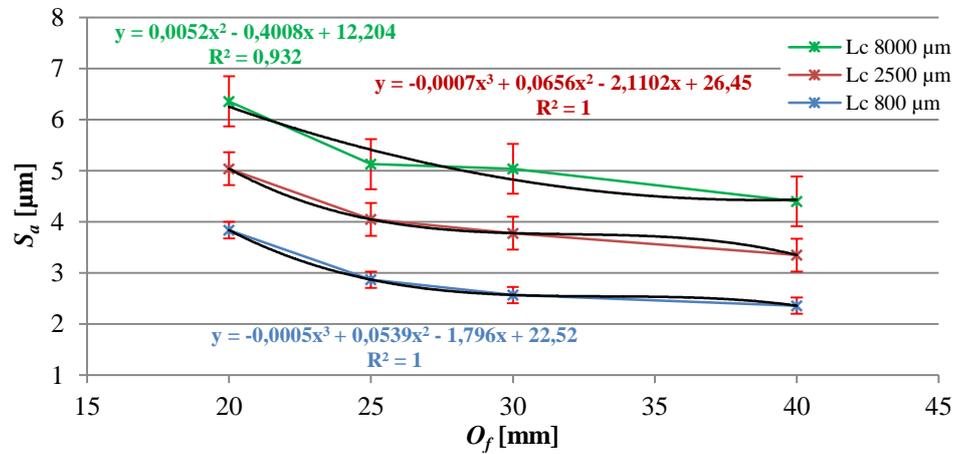


Figure 4.28: modélisation multi-échelles de l'Offset pour des valeurs situées entre 20 et 40 mm

Cependant, l'analyse visuelle des surfaces permet de remarquer une évolution de la couleur des topographies, causée par une variation de l'efficacité la protection gazeuse (Figure 4.29). Pour de faibles distances d'offset (0 - 7,5 mm), la protection gazeuse effectuée par la buse est efficace. À partir de 10 mm l'argon atteint par contre difficilement la surface, ce qui tend à créer de l'oxydation.

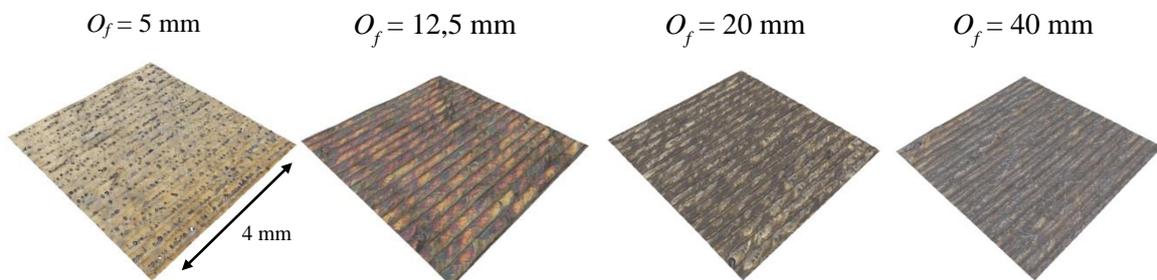


Figure 4.29: impact de l'Offset sur la protection gazeuse

4.4.2.6 Impact de la densité d'énergie

La puissance et l'avance peuvent être linéairement couplées à travers la densité d'énergie (Eq.4.2). Cela peut être un avantage en termes d'optimisation, car cela implique l'utilisation d'un seul paramètre. Dans ce cas, une même densité d'énergie peut être obtenue selon différents couples de puissance et d'avance ce qui peut éventuellement avoir un impact sur le résultat final. Pour étudier l'impact des différents couples de puissance et d'avance obtenus pour une même densité d'énergie, plusieurs tests ont été effectués. Dans cette campagne, les puissances varient entre 100 et 300 W par palier de 50 W, tandis que l'avance augmente linéairement afin d'obtenir une densité d'énergie de 787 J/Cm² (Tableau 4.2).

$$E = \frac{6000 * P}{D * V_f} \quad \text{Eq.4.2}$$

Avec D le diamètre du faisceau laser.

Les résultats montrent un comportement homogène pour les couples 2 à 5 sur le S_a calculé avec un λ_c de 800 μm (Figure 4.30) tandis que le premier couple de paramètre donne un S_a largement supérieur. Les couples de paramètres ont un impact identique selon le filtre de coupure. L'emploi de puissances situées entre 150 et 300 W et couplées à des avances situées entre 2142 et 4285 mm/min permet une maîtrise du résultat final au niveau de la rugosité surfacique. Cependant, pour le dernier couple de paramètre ($P= 300\text{W}$ et $V_f= 4285$ mm/min) on remarque une texture finale très directionnelle, ce qui peut avoir un impact sur la fonctionnalité de la surface polie.

Couples P / V_f	P [W]	V_f [mm/min]	E [J/cm²]
1	100	1428	787
2	150	2142	787
3	200	2857	787
4	250	3571	787
5	300	4285	787

Tableau 4.2 : valeurs opératoires de la puissance et de l'avance pour une même densité d'énergie

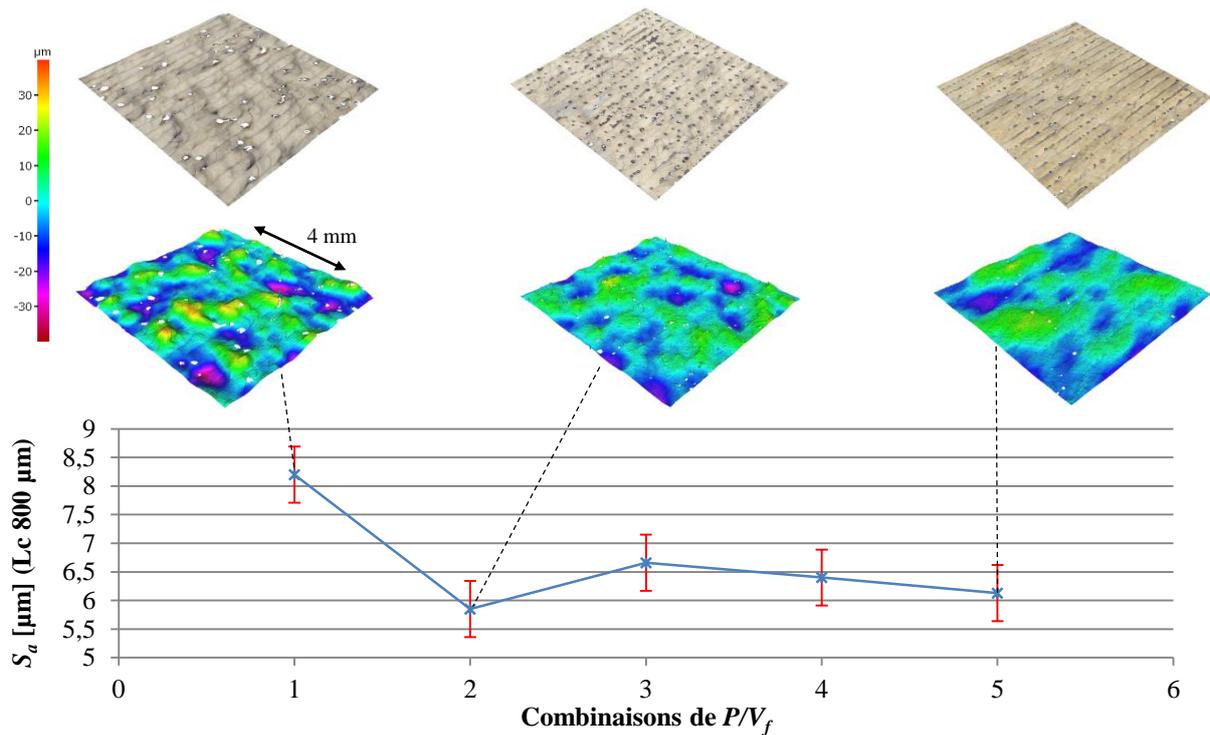


Figure 4.30: impact des combinaisons de P et V_f sur le S_a

Compte tenu de l'impact des couples de paramètres de puissance et d'avance pour une densité donnée, il est préférable de dissocier ces paramètres en vue de maîtriser le résultat final, que ce soit en matière de rugosité surfacique ou de texturation.

4.4.3 Applications

4.4.3.1 Polissage laser du TA6V

Afin d'élargir le domaine d'application des procédés étudiés, le polissage laser est appliqué à un alliage de titane de type TA6V. Les paramètres opératoires du procédé de polissage laser sont identiques aux paramètres déterminés optimaux lors du polissage de l'acier inoxydable de type 316L : une puissance de 750 W, une avance de 3000 mm/min, et un taux de recouvrement de 60 %. Deux stratégies sont utilisées : une stratégie simple et une stratégie multi-passes utilisant 5 passes identiques. Ces essais permettent d'obtenir un S_a de 3,3 μm pour la stratégie simple et 0,64 μm pour la stratégie multi-passes, pour une rugosité surfacique initiale de 26 μm , amenant à un pourcentage de réduction maximal d'environ 97% (Figure 4.31). L'augmentation du nombre de passes améliore le résultat final. La topographie initiale est cependant toujours présente, traduite par une texture aléatoire de type peau d'orange. L'efficacité du polissage laser sur le TA6V est plus prononcée comparée au 316L, qui permet d'obtenir un S_a de 0,79 μm pour une rugosité surfacique initiale de 21 μm . Cet écart d'efficacité est directement lié aux propriétés des matériaux. A noter : aucun problème d'intégrité n'est engendré par le polissage laser dans le cas de l'alliage de Titane, que ce soit en termes de fissuration ou d'oxydation.

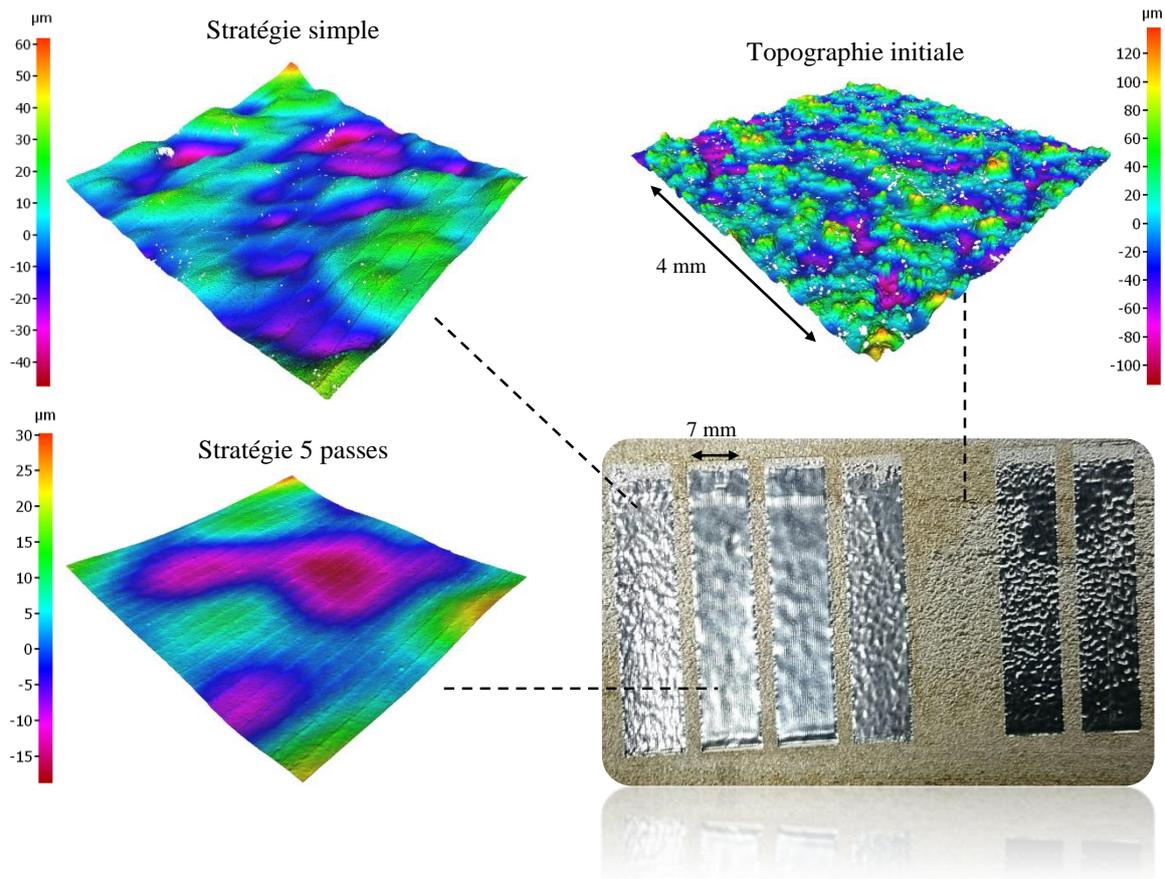


Figure 4.31: topographies initiales et polies par laser dans le cas du TA6V

4.4.3.2 Polissage laser de pièce de forme complexe

Conformément à une application industrielle, le procédé de polissage laser est appliqué à une pièce de forme complexe et de section mince. La stratégie de polissage utilisée est de type plan (Figure 4.32), ce qui permet de simplifier la programmation. Dans ce cas, la distance focale du faisceau par rapport à la surface est variable durant le traitement laser. Afin d'éliminer la variation géométrique, la puissance laser a été diminuée par rapport à la puissance déterminée lors des essais de faisabilité. Une puissance de 100 W est ainsi utilisée pour une avance de 3000 mm/min et cela suivant un nombre de passes égal à 5. Après traitement, la topographie initiale est lissée (Figure 4.33) et aucune variation géométrique n'est relevée visuellement. Une réduction de rugosité surfacique de 62 % est obtenue pour un S_a initial de 18 μm et un S_a final de 2,34 μm . La diminution de la puissance permet d'éviter la déformation de la pièce. Cependant, l'adaptation de la puissance implique une augmentation du S_a , comparée à une puissance de 210 W.

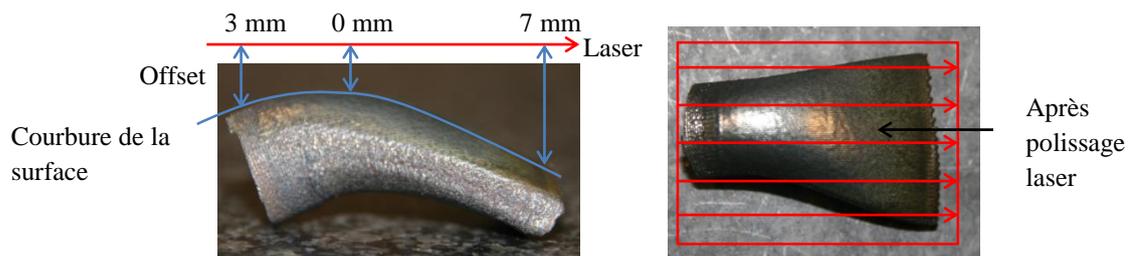


Figure 4.32: stratégie de polissage utilisée pour le traitement d'une surface complexe

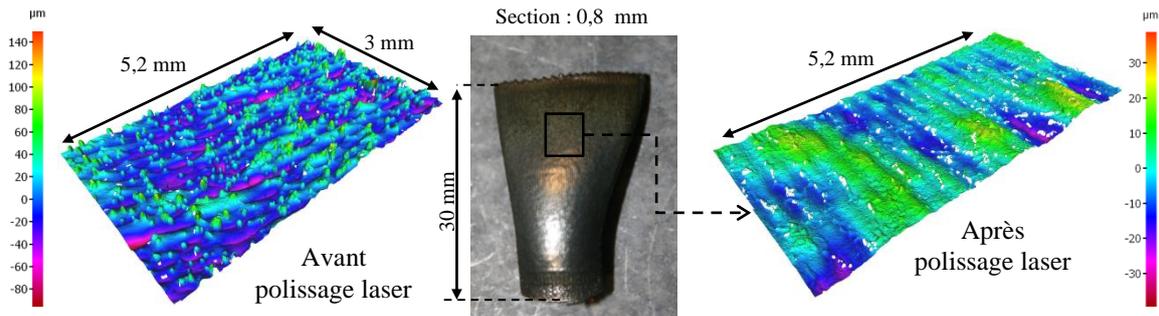


Figure 4.33: surface de forme complexe et de section mince polie par laser

Cette étude met en avant une certaine corrélation entre les paramètres opératoires du procédé de polissage laser et la topologie de la pièce. Dans une optique de maîtrise vis-à-vis de la rugosité surfacique et de la géométrie finale, il est nécessaire d'adapter les paramètres opératoires du polissage laser afin de garantir le cahier des charges.

4.4.4 Conclusion

Cette étude se positionne dans un contexte de polissage laser de plans, et permet de mettre en avant les problématiques engendrées par le procédé en termes de rugosité, d'intégrité et de déformation. Cette étude propose des modèles de comportements des paramètres opératoires applicables à des pièces non déformables. Compte tenu des résultats, certaines conclusions peuvent être établies :

- L'environnement gazeux est un paramètre opératoire qui a un impact sur l'intégrité de la surface, et plus particulièrement sur l'oxyde de silice dans le cas du 316 L.
- L'avance a une incidence sur la rugosité surfacique, la fissuration et la productivité. Le point optimal déterminé suivant ces trois fonctions objectif se situe à 3000 mm/min. Les modèles de régression permettent de modéliser le comportement du paramètre selon une vision multi-échelles suivant le S_a , avec des corrélations avec les valeurs expérimentales situées entre 72 et 92 %.
- Le taux de recouvrement de passe influe lui aussi sur la fissuration, la rugosité et la productivité. Le point optimal est de 60 % concernant la rugosité surfacique et l'intégrité de surface. Au-dessus d'un Overlap de 60%, des microfissures sont engendrées. La modélisation multi-échelles montre un plus fort impact du taux de recouvrement sur les composantes d'ondulation, et les modèles proposés disposent d'une corrélation avec les données expérimentales située entre 95 et 97 %. Le taux de recouvrement est un paramètre stable et robuste qui dispose d'un comportement similaire pour des paramètres et des topographies initiales différentes.
- Dans une optique de maîtrise, il est nécessaire d'adapter les paramètres opératoires du procédé de polissage laser en fonction de la topologie de la pièce à traiter.
- Le nombre de passes a un impact sur l'intégrité de surface, la rugosité surfacique et la productivité. Il est montré que ce paramètre influence d'avantage l'ondulation et qu'une augmentation du nombre de passes améliore le lissage. Les modèles proposés permettent de déterminer l'optimum vis-à-vis d'une analyse multi-échelles de l'amplitude et de l'espacement des composantes d'ondulation.

- Le polissage laser du TA6V permet d’obtenir un pourcentage de réduction de rugosité surfacique de 97%. Concernant ce matériau, aucun défaut d’intégrité n’est relevé après polissage laser.
- Enfin, il est possible de traiter des surfaces complexes à travers une programmation simple.

Le procédé de polissage laser est composé de paramètres opératoires qui influencent hiérarchiquement l’optimisation du résultat final. Dans un contexte plus général de maîtrise et de compréhension, il ressort que le nombre de passes intervient suite aux limites d’optimisation du taux de recouvrement (Figure 4.34).

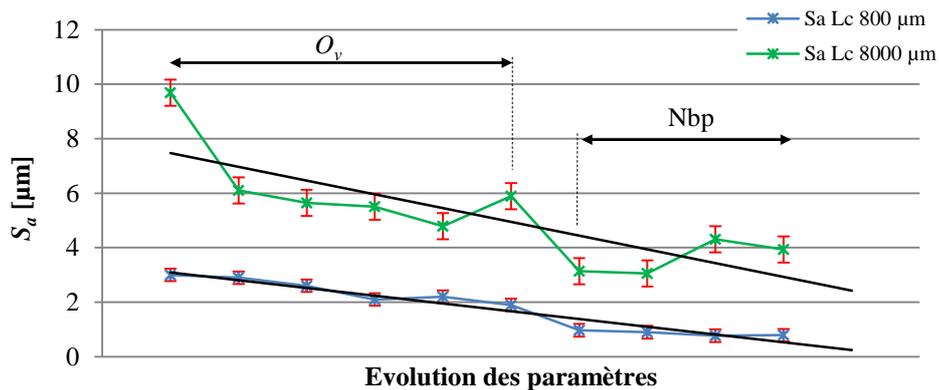


Figure 4.34: hiérarchisation de l’Overlap et du nombre de passes sur l’optimisation

4.5 Polissage laser de surfaces cylindriques

Cette seconde étude permet d’analyser plus précisément le procédé de polissage laser dans un contexte de fabrication de pièce de forme complexe et de section mince, par la prise en compte de la courbure de la pièce et de la déformation. La courbure est une caractéristique des pièces de formes complexes, c’est pourquoi il est pertinent de proposer des paramètres opératoires adaptés à cette caractéristique topologique. De plus, associée aux sections minces, cette caractéristique topologique influence davantage sur la rigidité de la pièce et donc la déformation géométrique durant le polissage.

Expérimentalement, les échantillons obtenus par fabrication directe intègrent trois rayons de courbure différents de 10, 20 et 30 mm (Figure 4.35).

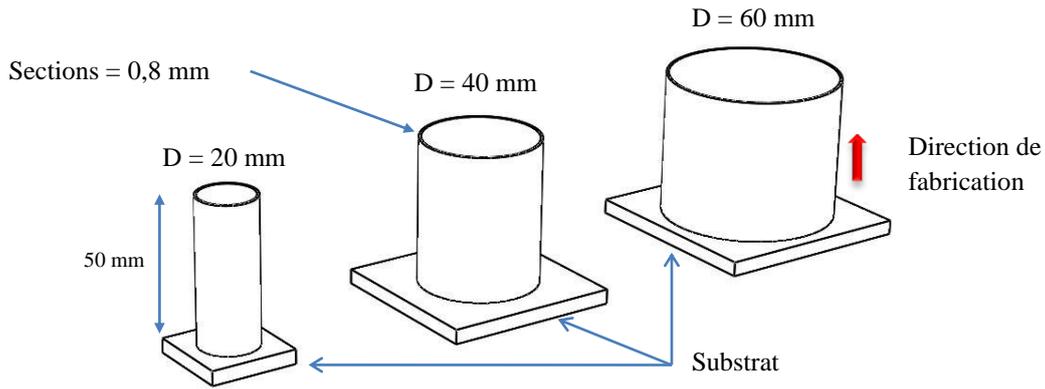


Figure 4.35: topologie des échantillons utilisés pour la campagne exploratoire

La stratégie de polissage est perpendiculaire à la topographie initiale et normale à la surface. Expérimentalement et dans le cadre du polissage de surfaces cylindriques, il n'est pas possible d'utiliser la cellule de confinement avec le matériel utilisé. De ce fait, la protection gazeuse est réalisée seulement avec la buse lors du polissage laser des surfaces cylindriques. Lors des expérimentations, les cylindres sont mis en position par une calle et maintenus par un système de serrage (Figure 4.36).

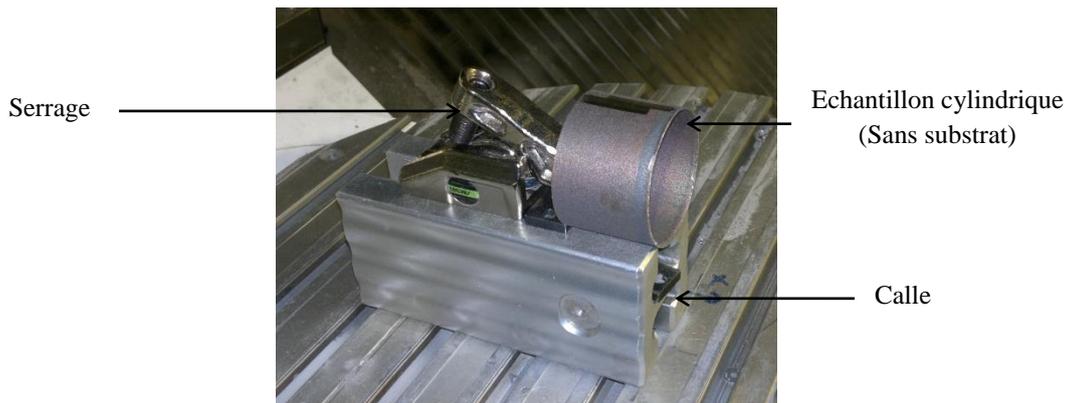


Figure 4.36: montage utilisé pour l'opération de polissage suivant une stratégie 5 axes normale à la surface

4.5.1 Modélisation et optimisation

4.5.1.1 Impact de la cellule de confinement

Dans le cas du polissage de forme complexe, la cellule de confinement est un point contraignant en termes d'encombrement. En vue de maîtriser le résultat final, il est nécessaire de comprendre l'impact de l'environnement gazeux.

Les expérimentations (Figure 4.37) montrent deux comportements différents de l'avance selon les deux cas de figures : avec et sans cellule de confinement.

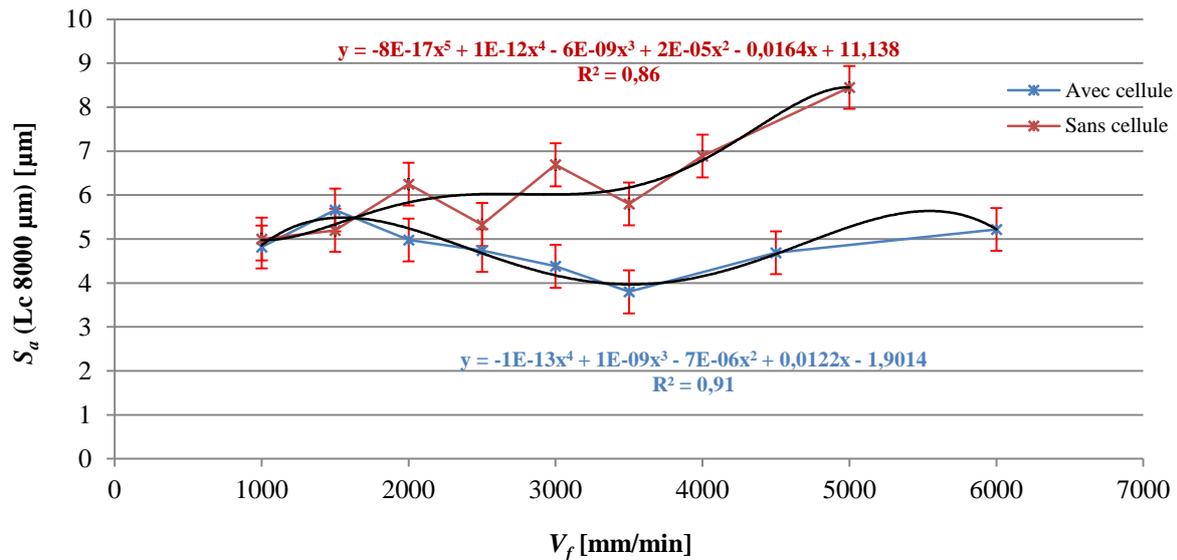


Figure 4.37: impact de l'environnement sur le S_a en fonction de l'avance

Dans le cas d'un environnement maîtrisé, l'avance tend à diminuer le S_a pour des valeurs situées entre 1000 et 3500 mm/min. Au-delà de cette valeur, l'augmentation de l'avance tend à augmenter le S_a . Dans cette configuration, le S_a optimal est obtenu pour une avance de 3500 mm/min.

Dans le cas d'une protection uniquement réalisée par la buse de projection, l'augmentation de l'avance tend à augmenter le S_a sur l'ensemble des valeurs étudiées. De plus, pour des valeurs situées au-dessus de 1500 mm/min, l'avance crée des microfissures (Figure 4.38). Dans un environnement non maîtrisé, il est préférable d'utiliser une avance de 1500 mm/min afin de garantir l'intégrité de la surface et des temps de cycles optimaux.

L'environnement gazeux conditionne le domaine de faisabilité du procédé concernant la fissuration de la surface. L'environnement a tendance à décaler le domaine de faisabilité de l'avance.

Dans l'ensemble, la maîtrise de l'environnement permet d'obtenir de plus faibles rugosités surfaciques. Cependant, comme énoncé précédemment, l'utilisation d'une cellule de confinement en polissage 5 axes est difficilement envisageable. Dans un contexte industriel, il sera nécessaire de maîtriser la protection gazeuse tout en optimisant les possibilités de mouvement de la machine. La première solution consiste à concevoir une buse de projection disposant d'une protection gazeuse adaptée au procédé de polissage laser. La seconde, moins économique en matière de consommation d'argon, consisterait à maîtriser l'environnement complet de la machine. Enfin, la dernière solution est déjà opérationnelle sur certaines machines de polissage laser, qui disposent d'une cellule de confinement englobant le plateau de la machine. Dans ce dernier cas, le faisceau laser traverse une plaque de verre avant d'atteindre la surface métallique. Cette solution peut dans certains cas, limiter l'accessibilité des surfaces de formes complexes.

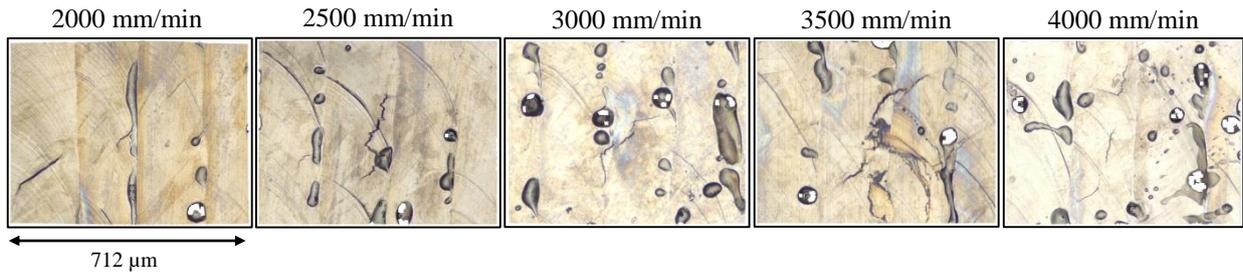


Figure 4.38: fissurations suivant l'avance sans cellule de confinement

4.5.1.2 Modélisation et optimisation de l'avance

L'avance dispose d'un comportement relativement linéaire sur la rugosité, tandis que sur l'ondulation, le comportement devient plus aléatoire (Figure 4.39). Globalement, l'augmentation de l'avance tend à augmenter la rugosité surfacique et ce paramètre opératoire a un plus fort impact sur les composantes d'ondulation. L'augmentation de l'ondulation et de la rugosité selon l'augmentation de l'avance peut s'expliquer par une diminution de l'efficacité du lissage à plus faible densité d'énergie, mais aussi par une augmentation de l'oxyde de silice à plus haute vitesse (Figure 4.40). Les modèles proposés permettent de traduire le comportement de l'avance selon une analyse multi-échelles, et disposent d'une corrélation avec les valeurs expérimentales situées entre 86 et 97 %.

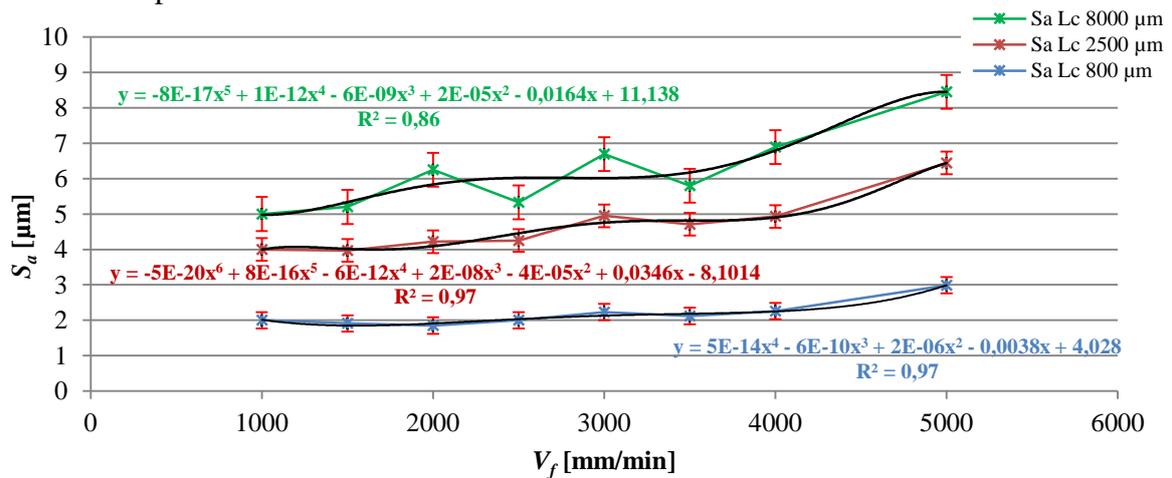


Figure 4.39: modélisation multi-échelles de l'avance dans le cas d'un environnement gazeux non maîtrisé

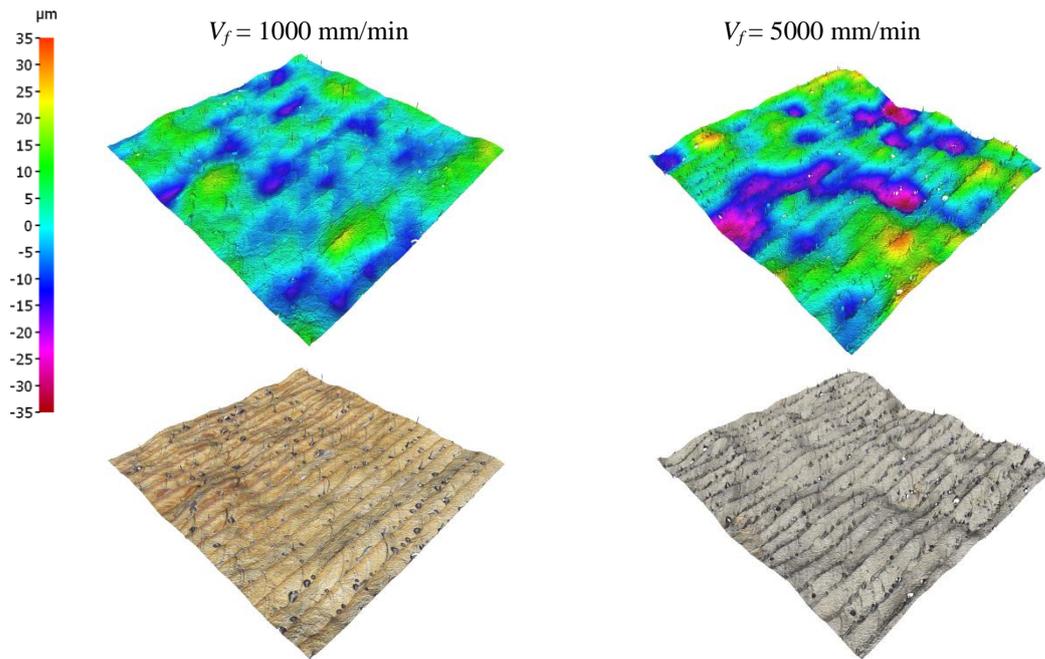


Figure 4.40: impact multi-échelles suivant l'augmentation de l'avance (diminution de l'efficacité et augmentation de l'oxyde de silice)

4.5.1.3 Modélisation et optimisation de la puissance

L'analyse du comportement de la puissance s'appuie sur des valeurs situées entre 55 et 205 Watts et évoluent par palier de 50. L'impact de la puissance sur la rugosité superficielle suit le même comportement selon les trois filtres de coupures utilisés pour le calcul du S_a . Le comportement du paramètre se divise en deux parties (Figure 4.41). La première partie concerne des puissances situées entre 55 et 105 W. Dans cette plage de valeurs, la rugosité superficielle est fortement diminuée. En revanche, pour la deuxième partie, qui concerne des valeurs comprises entre 105 et 205 W l'impact est radicalement plus faible. Cette différence de comportement traduit l'efficacité du procédé, qui atteint ses limites autour de 205 W.

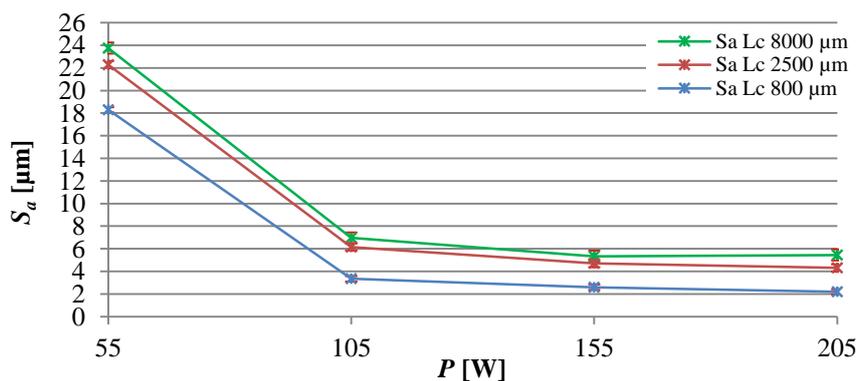


Figure 4.41: impact de la puissance sur le Sa selon une analyse multi-échelles appliquée à une courbure de rayon 30 mm

Les modèles proposés permettent de prédire la puissance dans une plage de valeur efficace vis-à-vis de la rugosité superficielle (Figure 4.42). L'architecture des modèles est parfaitement corrélée aux données expérimentales et permettent de prédire des valeurs de puissances situées entre 105 et 205 W.

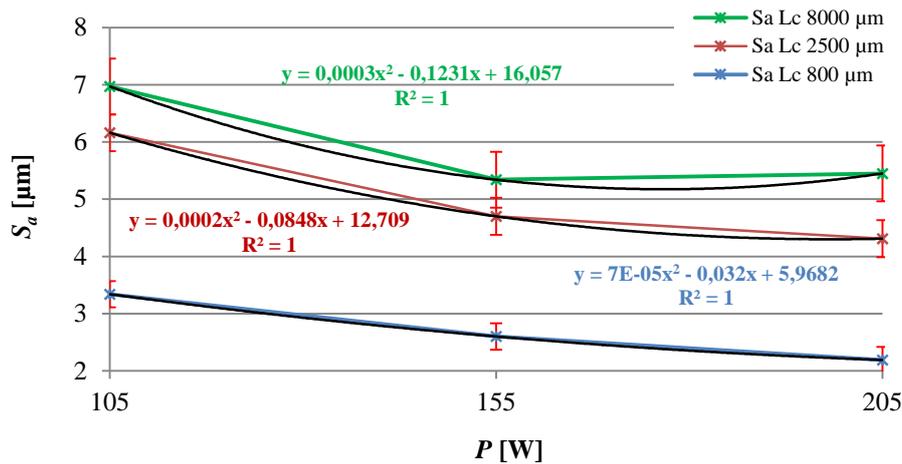


Figure 4.42: modélisation multi-échelles du comportement de la puissance

4.5.1.4 Modélisation et optimisation de l'Overlap

Tout comme lors du polissage de plans, le comportement de l'Overlap appliqué au cylindre suit une même évolution, c'est-à-dire plus linéaire concernant la rugosité. Les modèles de régression proposés disposent d'une bonne corrélation avec les valeurs expérimentales (Figure 4.43).

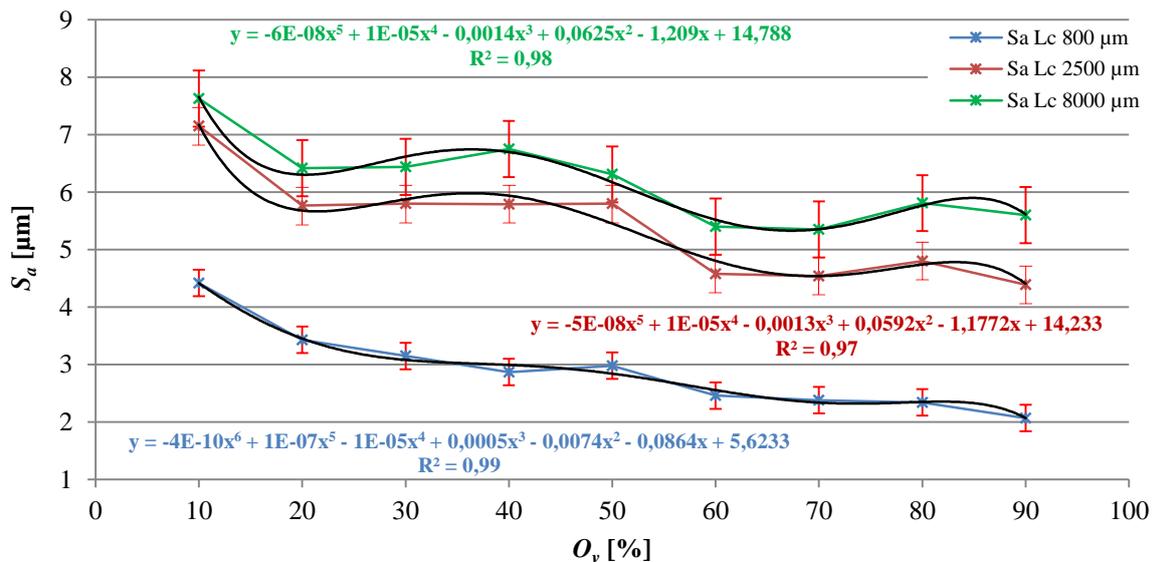


Figure 4.43: modélisation multi-échelles du taux de recouvrement appliqué à un rayon de courbure de 30 mm pour une puissance de 155 W

Dans une optique de compréhension globale du système, il est intéressant d'étudier le comportement de l'Overlap selon différentes puissances laser suivant un contexte réel d'utilisation (Figure 4.44).

L'analyse de l'évolution du comportement de l'Overlap selon la puissance, montre un impact de la corrélation des deux paramètres sur le résultat final. En effet, l'augmentation de la puissance tend à améliorer l'efficacité de l'Overlap et donc du S_a . On remarque cependant une limitation de l'efficacité de la puissance, traduite par un espacement vertical des modèles de régression qui tend à diminuer avec l'augmentation de la puissance. Autrement dit, une augmentation de la puissance n'implique pas forcément une amélioration du lissage. Dans le cas étudié, les paramètres du procédé de polissage touchent la limite d'optimisation. Cela pousse à utiliser d'autres paramètres opératoires, comme le nombre de passes.

Les modèles de régression proposés disposent d'une très bonne corrélation avec les données expérimentales : de l'ordre de 97 à 99 %.

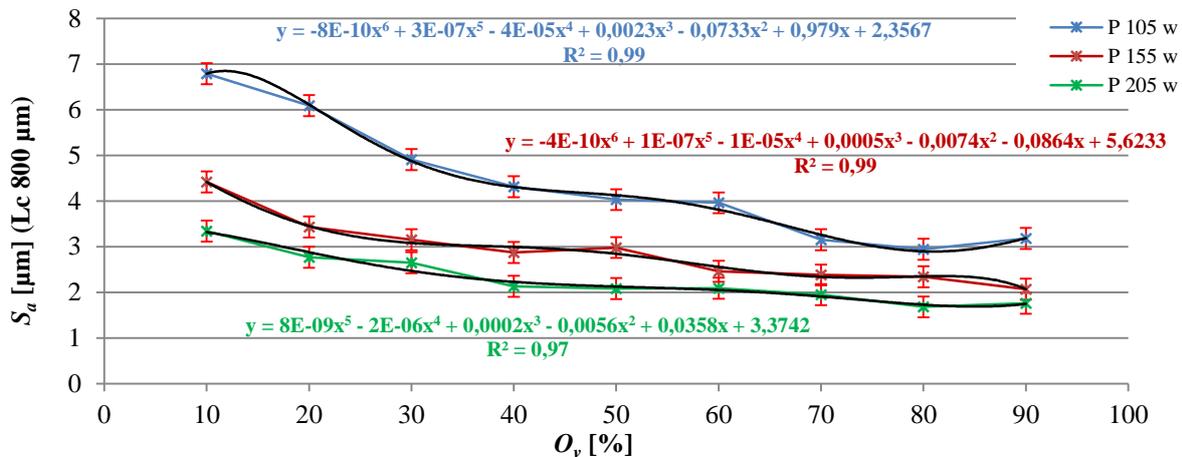


Figure 4.44: évolution du comportement de l'Overlap selon la puissance

4.5.1.5 Modélisation et optimisation du nombre de passes

Le paramètre du nombre de passes intervient suite aux limites d'optimisation du taux de recouvrement. Son comportement est identique pour des filtres de 8000 et 2500 µm et devient plus linéaire pour un filtre de 800 µm (Figure 4.45). Les modèles de régression d'ordre 3 disposent d'une bonne corrélation avec les données expérimentales et permettent de prédire le résultat selon une vision multi-échelles.

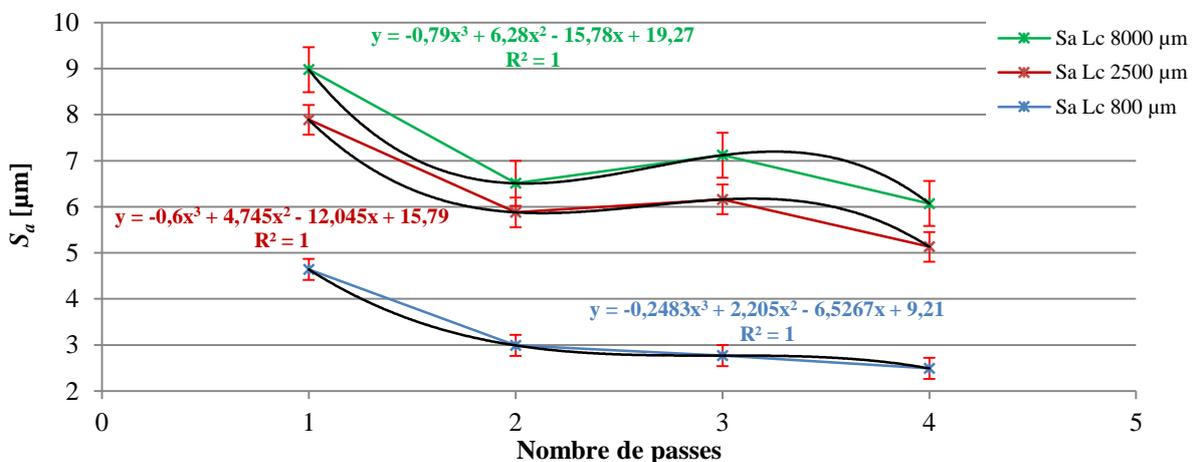


Figure 4.45: modélisation multi-échelles du comportement du nombre de passes pour une puissance de 105 W et un Overlap de 40%

L'évolution du comportement du nombre de passes en fonction de l'augmentation du taux de recouvrement traduit la corrélation entre les deux paramètres (Figure 4.46). De meilleures rugosités surfaciques sont obtenues pour un Overlap de 60 %. Le S_a final tend à se stabiliser à partir de trois passes. L'optimisation du S_a vis-à-vis de l'augmentation de l'Overlap et du nombre de passes n'est pas linéaire. L'efficacité est plus prononcée entre des valeurs d'Overlap de 20-40% et tend à se stabiliser aux alentours de 60 % (Figure 4.47). Une stratégie de quatre passes ainsi qu'un Overlap de 60 % permettent d'obtenir une réduction de S_a de 75, 79 et 90 % (λ_c 8000, 2500 et 800 µm).

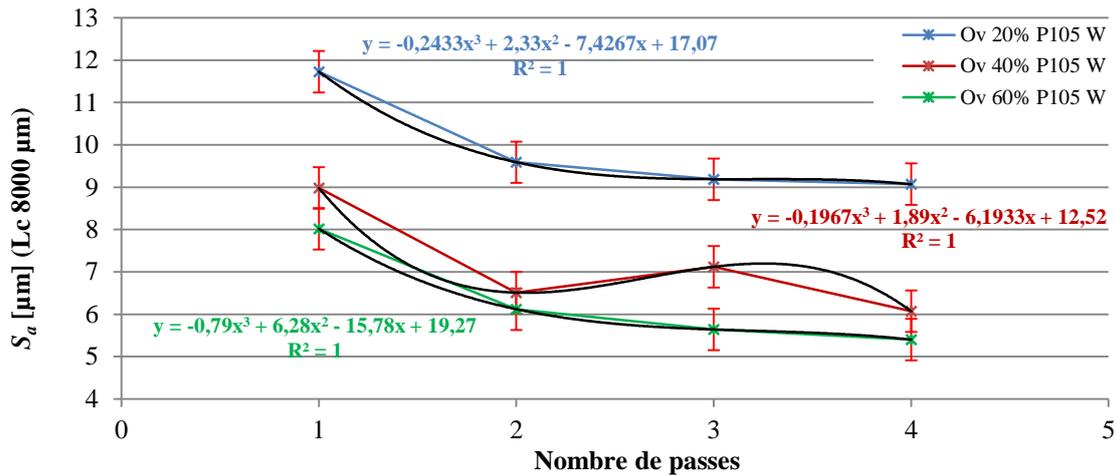


Figure 4.46: évolution du comportement du nombre de passes en fonction de l'Overlap

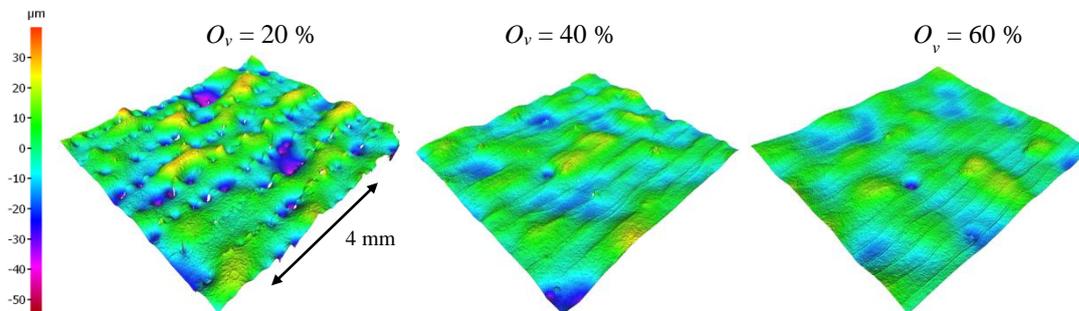


Figure 4.47: évolution du lissage en fonction de l'augmentation du taux de recouvrement selon une stratégie de 4 passes

4.5.1.6 Impact du rayon de courbure

Le comportement de la puissance sur le S_a diffère selon le rayon de courbure de la pièce (Figure 4.48). C'est le cas notamment pour une puissance de 205 W, ce qui montre que la puissance doit être adaptée à la topologie de la pièce.

Des rugosités optimales sont obtenues pour une puissance de 205 W et cela pour des rayons de courbure de 20 et 30 mm. Le point optimal diffère pour le rayon de 10 mm qui se situe à une puissance de 105 W. Pour ce même rayon de courbure, l'augmentation de la puissance a tendance à augmenter la rugosité surfacique à partir de 155 W contrairement aux rayons de 20 et 30 mm (Figure 4.49). Cette différence peut être causée par une variation du comportement thermodynamique engendrée par la courbure de la pièce qui a tendance à influencer l'efficacité du procédé. La figure 4.48 montre une diminution de l'efficacité pour une puissance de 205 W appliqué à un rayon de courbure de 10 mm. Ce constat montre qu'une augmentation de la puissance n'engendre pas forcément un meilleur lissage.

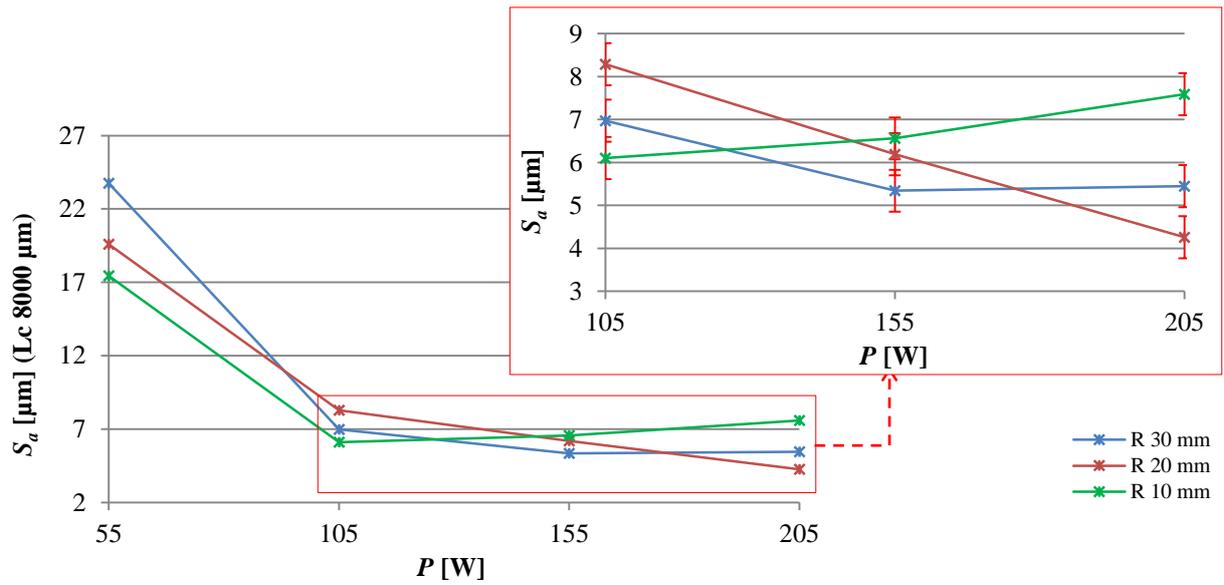


Figure 4.48: impact de la puissance sur le S_a en fonction du rayon de courbure

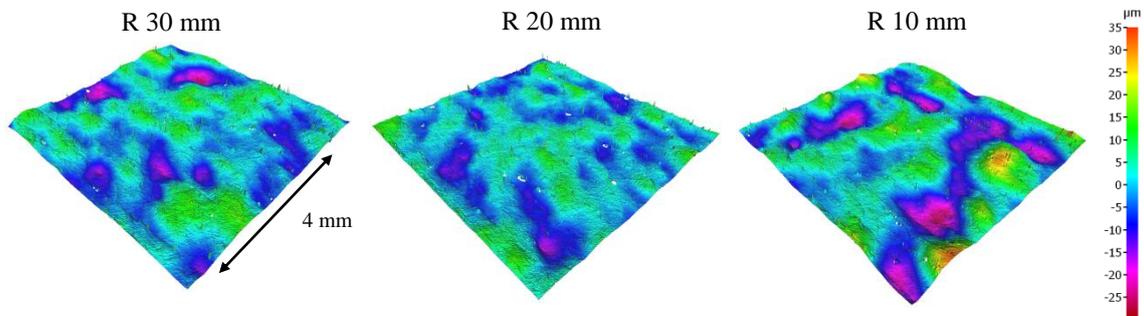


Figure 4.49: évolution de la topographie en fonction de la courbure de la pièce pour une puissance de 205 W

Parallèlement, pour une puissance plus faible de 55 W, la diminution de la courbure à tendance à augmenter l'efficacité du lissage (Figure 4.50). Cette variation d'efficacité peut être causée par le volume de la pièce qui a un impact sur les échanges thermiques. Dans le cas du rayon de 10 mm, la chaleur transmise par le laser a tendance à être stockée au sein du volume du cylindre, ce qui augmente la température en surface et donc l'efficacité du procédé.

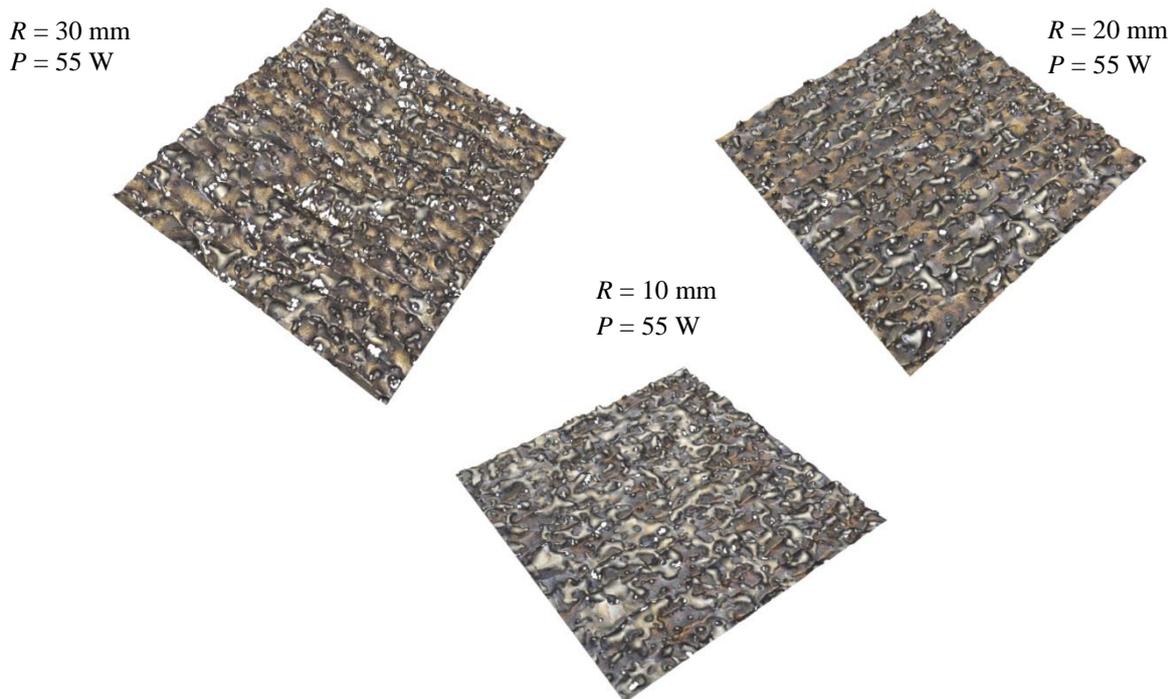


Figure 4.50: impact de la courbure sur l'efficacité du polissage laser

4.5.1.7 Analyse de la déformation géométrique

D'un point de vue géométrique, la corrélation de la puissance et de la courbure a un impact sur la déformation des pièces de sections minces. La déformation de la surface est quantifiée par rapport à la géométrie initiale, dans le sens de direction du laser et suivant la hauteur du cylindre (Figure 4.51).

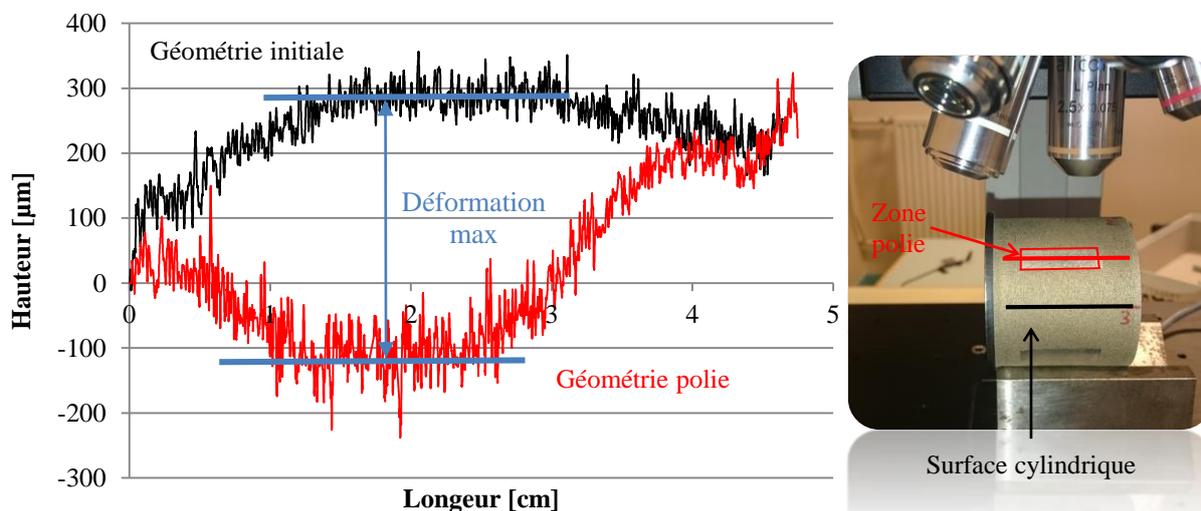


Figure 4.51: méthode de quantification de la déformation géométrique engendrée par le polissage laser

Des puissances de 55, 105, 155 et 205 W engendrent des déformations et ce quel que soit le rayon de courbure (Figure 4.52). La déformation minimale de 200 μm est obtenue pour une puissance de 55 W et un rayon de courbure de 10 mm. Cependant, cette faible puissance ne permet pas de lisser convenablement la surface. Une puissance de 205 W appliquée à un rayon de courbure de 30 mm engendre une déformation d'environ 1200 μm .

L'augmentation de la puissance tend à augmenter la déformation, et la diminution de la courbure permet une diminution de la variation géométrique.

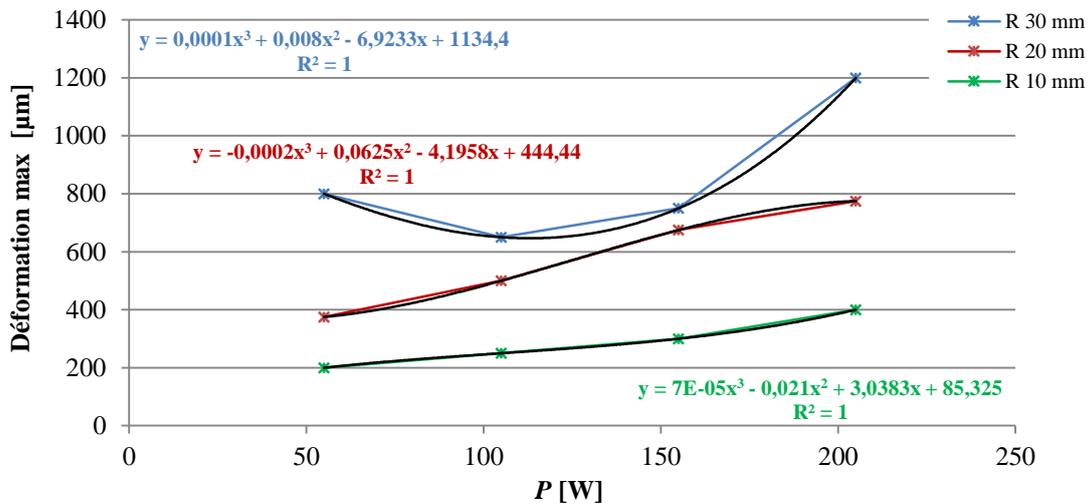


Figure 4.52: comportement de déformation en fonction de la puissance et de la courbure de la pièce

Une augmentation du taux de recouvrement augmente les variations géométriques de la surface cylindrique (Figure 4.53). Cependant, même avec un faible taux de recouvrement les déformations engendrées par le polissage laser sont excessives. Une modélisation statistique d'ordre 6 permet de modéliser le comportement de la déformation en fonction de l'Overlap atteignant une corrélation de 99 % avec les données expérimentales.

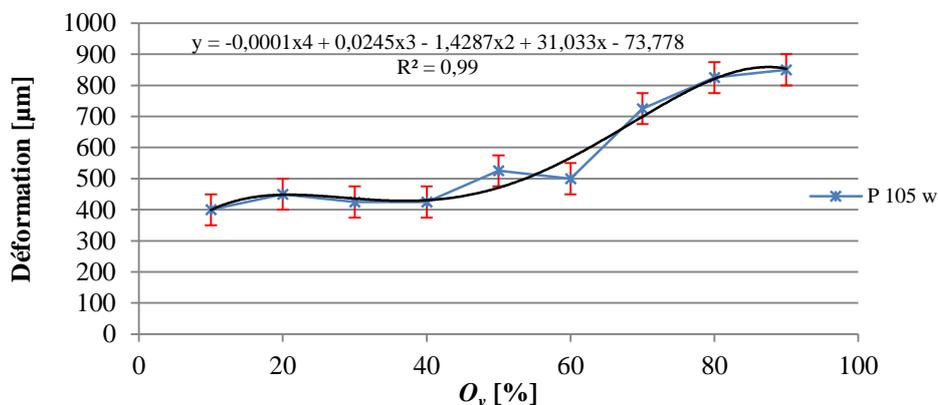


Figure 4.53: comportement de la déformation en fonction de l'Overlap pour une puissance de 105 W et un rayon de courbure de 30 mm

4.5.2 Conclusion

Cette deuxième partie d'étude se positionne dans un contexte de polissage laser de pièces de formes complexes et de section mince. La méthodologie d'investigation a permis de construire des modèles de comportement des paramètres opératoires, ainsi qu'une analyse de l'impact du rayon de courbure et de la déformation. Suite à cette étude plusieurs conclusions peuvent être établies :

- L'environnement gazeux a un impact sur la rugosité surfacique, et sa maîtrise permet d'améliorer le résultat final.

- L'augmentation de l'avance augmente la rugosité surfacique. Cette évolution est principalement causée par une diminution de l'efficacité de fonte à haute vitesse et par une augmentation de l'oxyde de silice. L'avance a un impact plus prononcé sur l'ondulation de la surface.
- Des puissances situées entre 55 et 205 W permettent de borner le domaine de faisabilité du paramètre. Une puissance de 55 W demeure trop faible quant au lissage, tandis que son efficacité se stabilise autour de 205 W. La limitation de l'efficacité de la puissance se répercute sur l'efficacité des autres paramètres comme l'Overlap et le nombre de passes.
- Globalement, l'augmentation du taux de recouvrement de passe a tendance à diminuer le S_a et son impact est plus prononcé sur la composante d'ondulation. L'Overlap est corrélé avec la puissance et le nombre de passes, et leur efficacité commune atteint une limite d'optimisation dans le domaine étudié.
- L'augmentation du nombre de passes améliore le lissage de la surface et influence davantage l'ondulation que la rugosité.
- Le rayon de courbure a un impact sur l'efficacité du polissage laser, ce qui implique une nécessité d'optimiser le procédé vis-à-vis de la topologie de la pièce.
- Enfin, la déformation de la surface est dépendante des paramètres opératoires et du rayon de courbure. Cependant, même avec une minimisation de la puissance, de l'Overlap et du rayon de courbure, les déformations engendrées demeurent excessives.

4.6 Conclusion générale

Le présent chapitre traite le polissage laser de pièces obtenues par projection de poudre métallique. Les analyses effectuées permettent d'alimenter la connaissance dans une optique de maîtrise et d'optimisation multi-procédés. Les connaissances apportées se situent sur deux échelles d'observation : de l'ordre scientifique et technique mais aussi plus globale, sur l'utilisation des procédés dans un contexte industriel.

Scientifiquement et techniquement, les investigations ont permis d'étudier l'impact des paramètres opératoires vis-à-vis de diverses fonctions objectifs qui caractérisent le cahier des charges. En outre, ces travaux de recherche conduisent vers une localisation des domaines de faisabilité et optimal du procédé de polissage laser vis-à-vis de la technologie par projection de poudre.

Le polissage laser dispose d'un domaine de faisabilité qui est dépendant des fonctions objectifs prises en compte. Ainsi, les expérimentations réalisées montrent que certains paramètres opératoires ont un impact sur la rugosité surfacique mais aussi sur l'intégrité de la surface, que ce soit sur la fissuration (Figure 4.54) ou l'oxydation (Figure 4.55). Les investigations montrent que le domaine de faisabilité vis-à-vis de l'intégrité porte sur une avance de 3500 mm/min dans le cas d'un environnement maîtrisé et se situe sur une avance comprise entre 1000 et 1500 mm/min pour un environnement non maîtrisé. Concernant l'Overlap le domaine de faisabilité se situe entre des valeurs de 10 à 60 %, pour le cas du 316L.

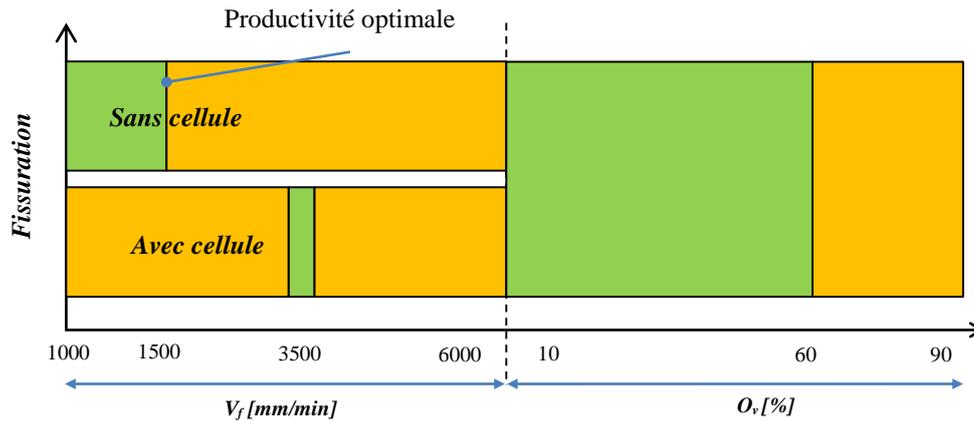


Figure 4.54: domaine de faisabilité de l'avance et du taux de recouvrement en fonction de la fissuration

Concernant l'oxydation, il est montré que des valeurs d'Offset situées entre 0 et 10 mm permettent d'éviter ce phénomène. Pour l'oxyde de silice, l'augmentation du nombre de passes limite sa concentration, mais ne permet pas de l'éliminer totalement.

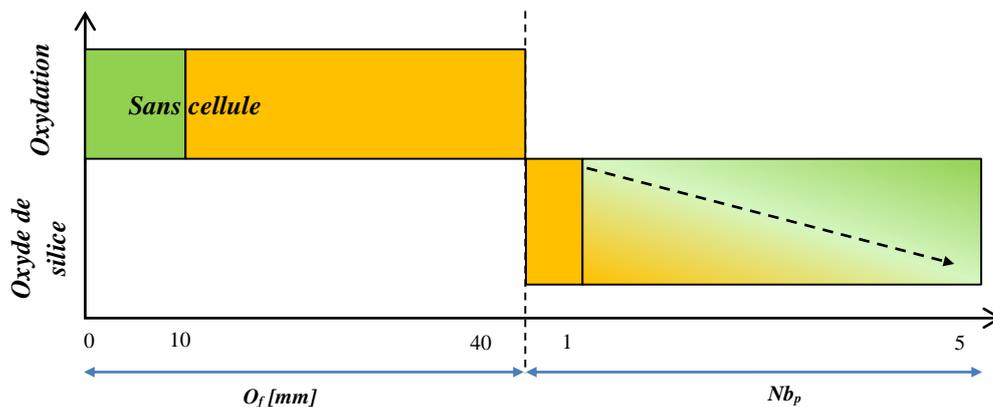


Figure 4.55: domaine de faisabilité de l'Offset et du nombre de passes en fonction de l'oxydation

Parallèlement, l'étude permet d'analyser l'impact des paramètres sur la déformation. Suivant les valeurs opératoires étudiées, il s'avère que le polissage laser crée une variation géométrique plus ou moins importante. Dans ce cas, il est nécessaire de confronter cette déformation avec les exigences du cahier des charges, afin de décider de l'acceptation ou du rebut de la pièce. Globalement, une minimisation de l'apport thermique couplée à une augmentation de la robustesse géométrique de la pièce permet de minimiser la déformation.

Concernant le domaine optimal, la présente étude permet de mettre place une hiérarchisation des paramètres opératoires à employer quant à l'optimisation topographique (Figure 4.56). Cette hiérarchisation permet de déterminer quel paramètre utiliser en vue de garantir le cahier des charges.

L'étude des paramètres opératoires montre que pour un taux de recouvrement et une avance donnée, la puissance dispose d'une limitation d'efficacité. Dans ce cas, la limitation de la puissance se répercute sur l'efficacité du taux de recouvrement. Ainsi, la puissance est le premier paramètre à régler pour une avance et un taux de recouvrement donnés.

Pour pallier cette limitation, il s'avère qu'une augmentation du taux de recouvrement permet de diminuer davantage la rugosité surfacique. Cependant, comme montré précédemment, le taux de recouvrement dispose d'un domaine de faisabilité vis-à-vis de l'intégrité de la surface. Globalement, le taux de recouvrement admet une amélioration de la rugosité au regard de la puissance, ce qui le positionne en deuxième place concernant l'optimisation.

Au même titre que le taux de recouvrement et selon son modèle comportemental, le nombre de passes admet une amélioration topographique supplémentaire. Son utilisation permet d'atteindre des valeurs de rugosités surfaciques inférieures à celles obtenues avec un taux de recouvrement optimal. De ce fait, le nombre de passes se situe en dernière position hiérarchique vis-à-vis de l'optimisation topographique, derrière l'Overlap et la puissance.

Ainsi, l'optimisation du procédé de polissage laser vis-à-vis de la rugosité surfacique s'effectue à travers le réglage hiérarchique suivant : puissance, taux de recouvrement et nombre de passes. En outre, le procédé de polissage laser peut être caractérisé suivant cette vision d'optimisation hiérarchique, qui permet d'obtenir progressivement la rugosité finale exigée. Comme montré par Landau et al. [Landau1959] (Eq.4.3) la diminution de l'amplitude de la fréquence spatiale de la surface décroît exponentiellement en fonction du temps d'interaction.

$$\zeta(t) = \zeta(0)e^{-\gamma t} \quad \text{Eq.4.3}$$

Avec ζ l'amplitude, γ le coefficient d'amortissement et t le temps d'interaction entre le laser et la surface. Physiquement, la hiérarchisation opératoire déterminée suit ce modèle, et admet une augmentation progressive du temps d'interaction entre le laser et la surface. Ainsi, chaque paramètre hiérarchique permet d'augmenter le temps de fonte du matériau, ce qui engendre une diminution de l'amplitude et donc de la rugosité surfacique.

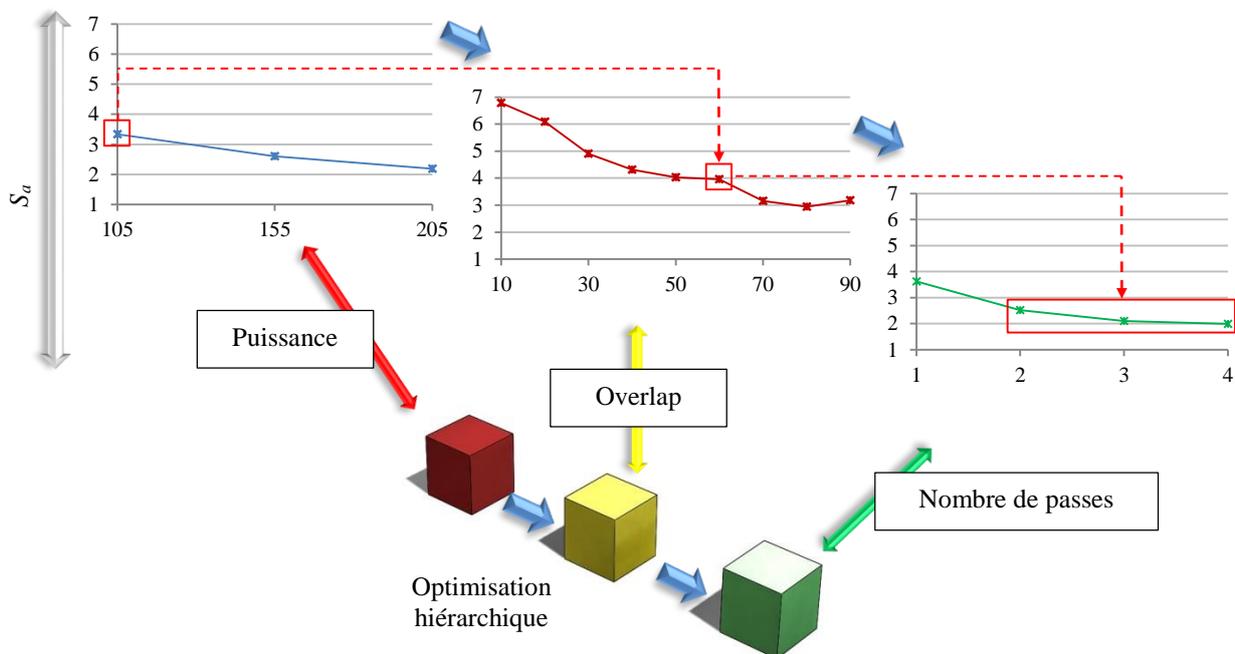


Figure 4.56: schématisation du principe d'optimisation hiérarchique

Au regard de la chaîne de fabrication, et selon la contrainte du cahier des charges, le polissage laser peut permettre d'éliminer l'utilisation d'une machine supplémentaire, ce qui diminue le coût de production et les dispersions de repositionnement. L'utilisation hybride du polissage et

de la fabrication directe, permet de traiter les zones non accessibles par l'alternance des deux procédés entre chaque couche de projection. Le cas échéant, la finition par laser peut être une alternative intéressante concernant certaines formes de pièces.

Le procédé de polissage laser apporte une nette amélioration de la qualité des surfaces obtenues par projection de poudre et permet une réduction de la rugosité surfacique d'environ 96 % et 97 % dans le cas du 316L et du TA6V.

Les investigations réalisées montrent aussi une certaine répétabilité du polissage laser vis-à-vis des matériaux. L'application au TA6V montre qu'avec les paramètres opératoires déterminés sur le 316L, il est possible de réduire considérablement la rugosité surfacique de la topographie initiale sans adaptation des paramètres. Le polissage laser admet de plus, l'utilisation de stratégies simples, de type plan, en vue de traiter des surfaces de formes complexes, ce qui permet de traiter simplement et rapidement un cas industriel.

Enfin, les modèles comportementaux proposés disposent d'une bonne corrélation avec les données expérimentales. Ainsi, ces modèles permettent de déterminer les paramètres opératoires à utiliser vis-à-vis d'une rugosité surfacique dictée par le cahier des charges. De plus, certains comportements opératoires ont un impact différent selon l'échelle d'observation topographique. L'analyse des modèles montre une certaine corrélation entre les paramètres opératoires, qui a tendance à se répercuter sur la rugosité surfacique finale.

Chapitre 5 : méthodologie de détermination des paramètres opératoires

5.1	Introduction	103
5.2	Concept général	103
5.3	Hierarchisation des modèles	104
5.4	Principe de détermination des comportements intermédiaires	105
5.4.1	Principe d'interpolation	106
5.4.2	Application du principe d'interpolation	108
5.5	Conclusion	110

5.1 Introduction

Le processus de polissage par laser fait intervenir différents paramètres liés ou non entre eux. On retrouve deux catégories principales de paramètres : les paramètres pièce, qui correspondent aux caractéristiques de la pièce à traiter, et les paramètres du procédé de polissage laser, qui sont les données à optimiser et à déterminer en fonction des données pièce. Le système complet peut être modélisé (Figure 5.1) suivant une approche entrée-sortie, avec comme entrée les paramètres pièce et comme sortie les paramètres opératoires. Ces deux groupes de paramètres doivent être optimisés sous la contrainte d'un troisième groupe, qui est le cahier des charges de la pièce et cela pour un environnement donné.

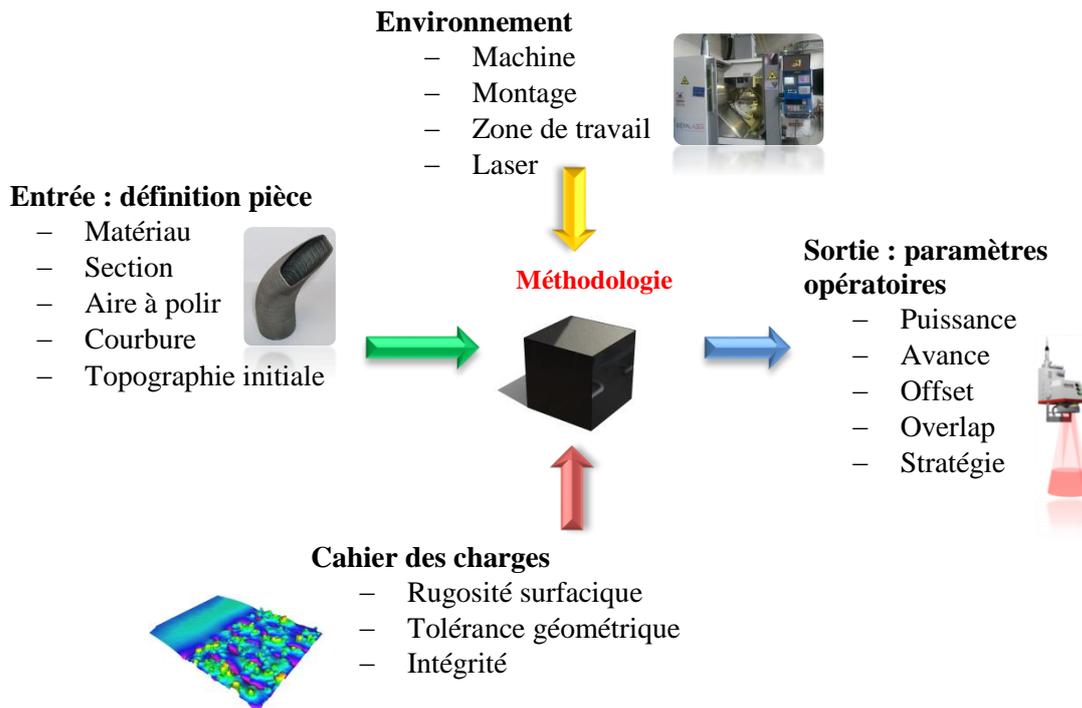


Figure 5.1: vision globale du système

La méthodologie proposée se situe au centre du système et doit permettre la détermination des paramètres opératoires vis-à-vis du cahier des charges, dans le cas du polissage laser de pièces obtenues par projection de poudres. Cette méthodologie doit aussi permettre d'augmenter la généralisation des modèles mathématiques obtenus précédemment. Plus précisément, il est question d'explorer davantage le volume de solution pour augmenter le nombre de solutions possibles. Enfin, dans une optique de maîtrise du résultat final, il est nécessaire de prendre en considération les interactions des paramètres opératoires.

5.2 Concept général

La méthodologie est fonctionnelle au sein du domaine de faisabilité déterminé précédemment. Dans ce cas, les valeurs opératoires étudiées permettent d'éviter les problématiques de fissuration, tout en garantissant le lissage de la topographie initiale.

L'avance utilisée est optimale et d'une valeur de 1500 mm/min. Cette avance déterminée expérimentalement permet de garantir l'intégrité de la surface tout en optimisant la productivité. Cette valeur d'avance est efficace pour un environnement, ouvert c'est-à-dire sans l'utilisation

d'une cellule de confinement. Concernant la puissance, la méthodologie s'appuie sur des valeurs situées entre 105 et 205 W, ce qui permet de garantir le lissage. Le taux de recouvrement, quant à lui, se situe entre des valeurs de 10 et 60 %, ce qui permet d'éliminer les problèmes de fissuration. Enfin, le nombre de passes avec des valeurs comprises entre 1 et 4 passes, correspond au domaine optimal concernant la rugosité surfacique.

Cette méthodologie permet de déterminer mathématiquement les modèles comportementaux intermédiaires aux modèles construits expérimentalement. Ce concept permet de discrétiser le volume de solution et d'ainsi augmenter les possibilités de réglages opératoires, dans le but d'approcher plus précisément la rugosité surfacique souhaitée.

La méthodologie se compose des modèles comportementaux des paramètres opératoires du procédé de polissage laser (Figure 5.2). Chaque modèle permet d'établir la relation entre la rugosité surfacique S_a [μm] et les valeurs opératoires du paramètre. La méthodologie s'appuie sur trois paramètres opératoires : la puissance, le taux de recouvrement (Overlap) et le nombre de passes.

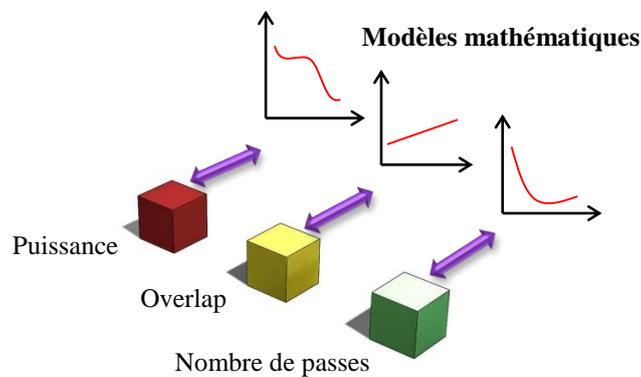


Figure 5.2: composition de la méthodologie

5.3 Hiérarchisation des modèles

Le choix du réglage des paramètres opératoires ainsi que leurs corrélations ont une influence sur l'optimisation de la rugosité surfacique. Comme le montrent les expérimentations du chapitre 4, l'optimisation topographique est progressive, et s'effectue à travers une organisation hiérarchique des paramètres opératoires, où chaque réglage opératoire se répercute sur le paramètre situé en aval et donc sur le résultat final.

Les modèles comportementaux contenus dans la méthodologie s'organisent suivant cette hiérarchisation d'optimisation, c'est-à-dire selon les réglages successifs de la puissance, du taux de recouvrement (Overlap) et du nombre de passes (Figure 5.3). Cette hiérarchisation permettra de déterminer les paramètres opératoires à utiliser pour obtenir progressivement la rugosité surfacique exigée. En d'autres termes, la méthodologie proposée prend en considération les interactions entre les paramètres opératoires.

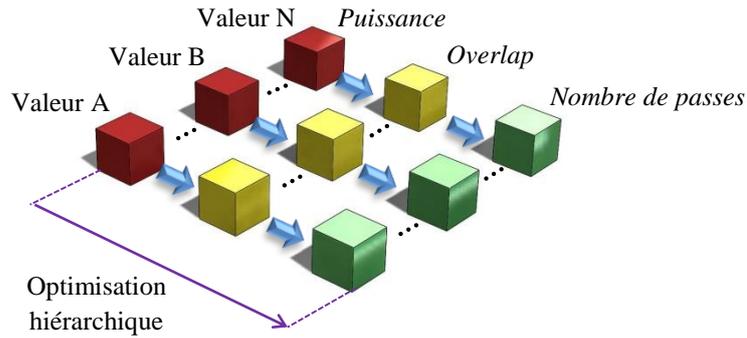


Figure 5.3: hiérarchisation des paramètres opératoires vis-à-vis de l'optimisation progressive de la rugosité surfacique

5.4 Principe de détermination des comportements intermédiaires

La détermination des comportements intermédiaires des paramètres opératoires s'appuie sur un principe d'interpolation (Figure 5.4). Ce principe s'articule autour d'une organisation hiérarchique des paramètres et s'effectue à partir des modèles construits expérimentalement.

Il est possible de déterminer le comportement du taux de recouvrement de passe pour une nouvelle puissance, extérieure à l'architecture du modèle de base. Il en est même pour le comportement du nombre de passes, qui peut être déterminé pour de nouvelles valeurs de taux de recouvrement et de puissance. Le principe d'interpolation prend en considération les interactions des paramètres opératoires. Les modèles construits expérimentalement sont la connaissance de base, qui servira à déterminer le nouveau comportement pour une nouvelle valeur opératoire hiérarchique.

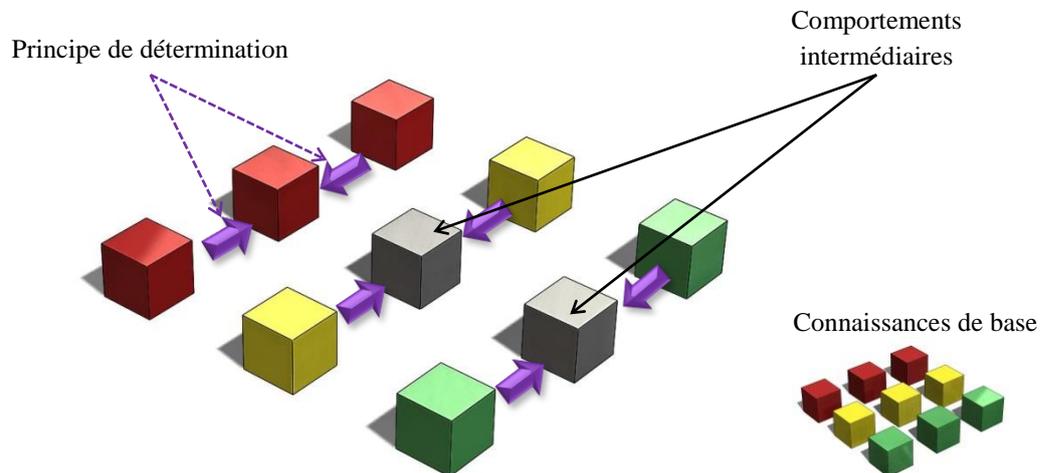


Figure 5.4: principe de détermination du comportement intermédiaire

Le principe d'interpolation permet de déterminer le comportement d'un paramètre pour de nouvelles valeurs opératoires, extérieures aux expérimentations. L'interpolation s'effectue à partir du modèle et non à partir des points de l'architecture (Figure 5.5), cela permet de déterminer une nouvelle valeur opératoire ainsi qu'un nouveau comportement. La détermination du comportement intermédiaire s'effectue à travers l'interpolation des modèles de base N et $N+1$ (Figure 5.6).

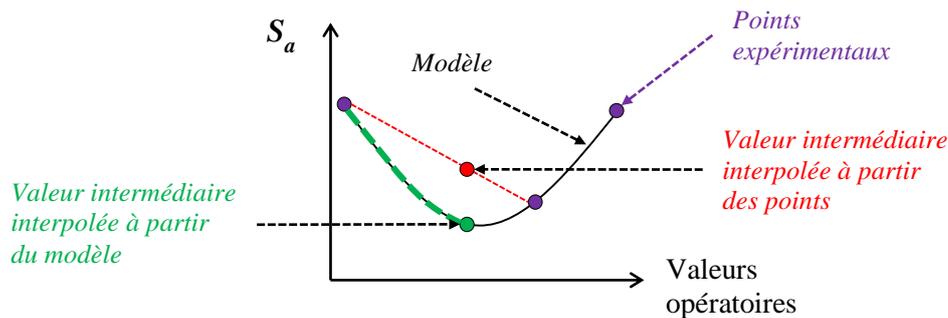


Figure 5.5: principe d'interpolation

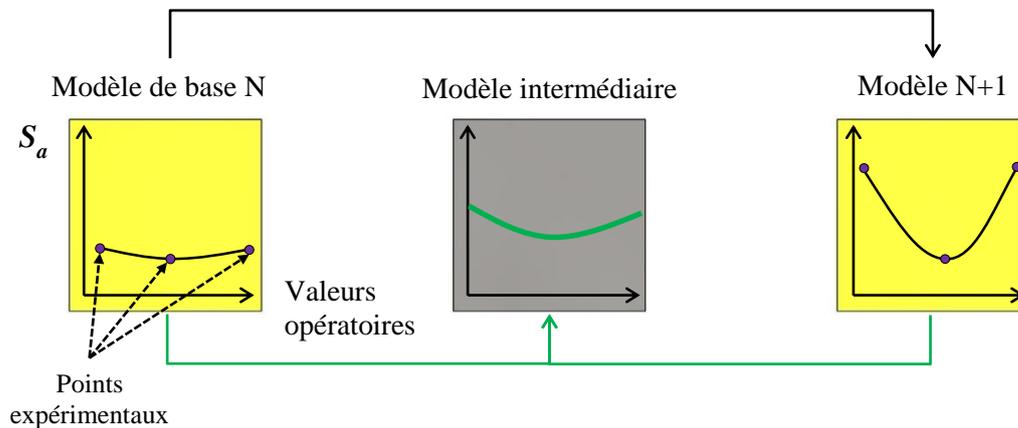


Figure 5.6: principe d'interpolation de modèles comportementaux

5.4.1 Principe d'interpolation

Le principe d'interpolation s'effectue selon la hiérarchisation des paramètres opératoires, et s'applique dans un premier temps au taux de recouvrement, puis au nombre de passes dans un second temps.

Il est possible de déterminer le comportement de l'Overlap pour une puissance non testée expérimentalement (Figure 5.7). Chaque comportement d'Overlap est dépendant d'une valeur de puissance où la variation de P influence le comportement d' O_v . Chaque modèle comportemental d'Overlap est associé à une valeur de puissance.

Le comportement intermédiaire, qui est à déterminer, est interpolé à partir des comportements d'Overlap obtenus pour des valeurs de puissances qui bornent la nouvelle puissance souhaitée. La position du comportement interpolé est dépendante de l'abscisse curviligne du modèle du paramètre hiérarchique. Le modèle interpolé permet de déterminer le comportement du taux de recouvrement de passe en fonction du S_a et ce pour une puissance donnée extérieure à l'architecture du modèle.

L'interpolation s'applique aussi au paramètre du nombre de passes (Nb_p) et permet de trouver le nouveau modèle pour une valeur d' O_v intermédiaire aux points expérimentaux et une puissance testée expérimentalement (Figure 5.8).

Etant donné la hiérarchisation des paramètres, chaque comportement du nombre de passes est dépendant d'une valeur d'Overlap. Le modèle interpolé Nb_p est obtenu à travers les modèles dépendants des valeurs opératoires qui bornent la nouvelle valeur d' O_v souhaitée. Au final, le

modèle interpolé permet d'obtenir le comportement du nombre de passes en fonction du S_a , et ce pour une nouvelle valeur d'Overlap.

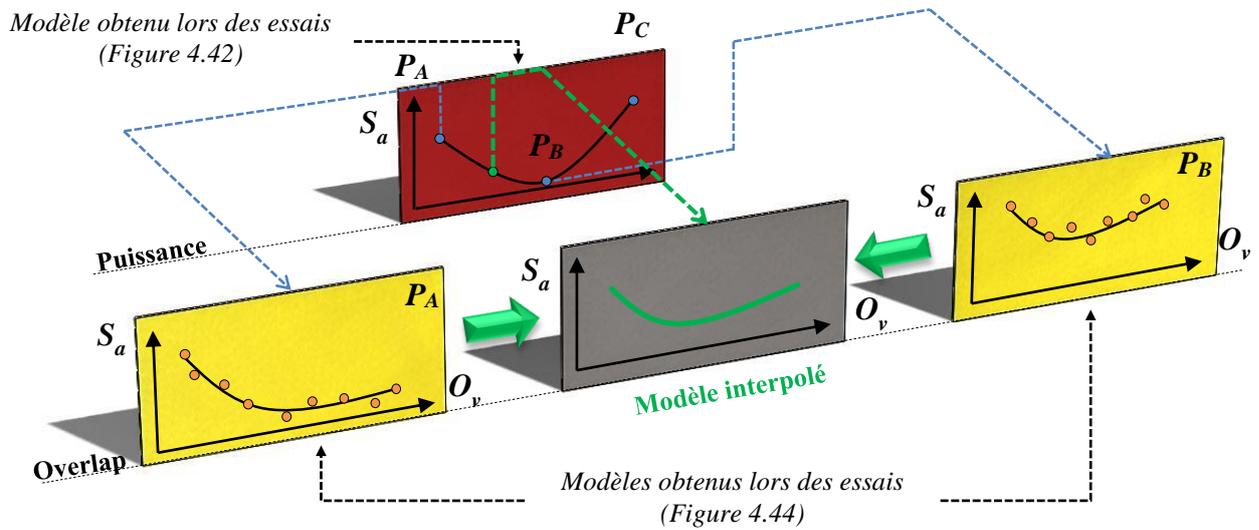


Figure 5.7: principe d'interpolation appliqué au taux de recouvrement de passe pour une puissance intermédiaire

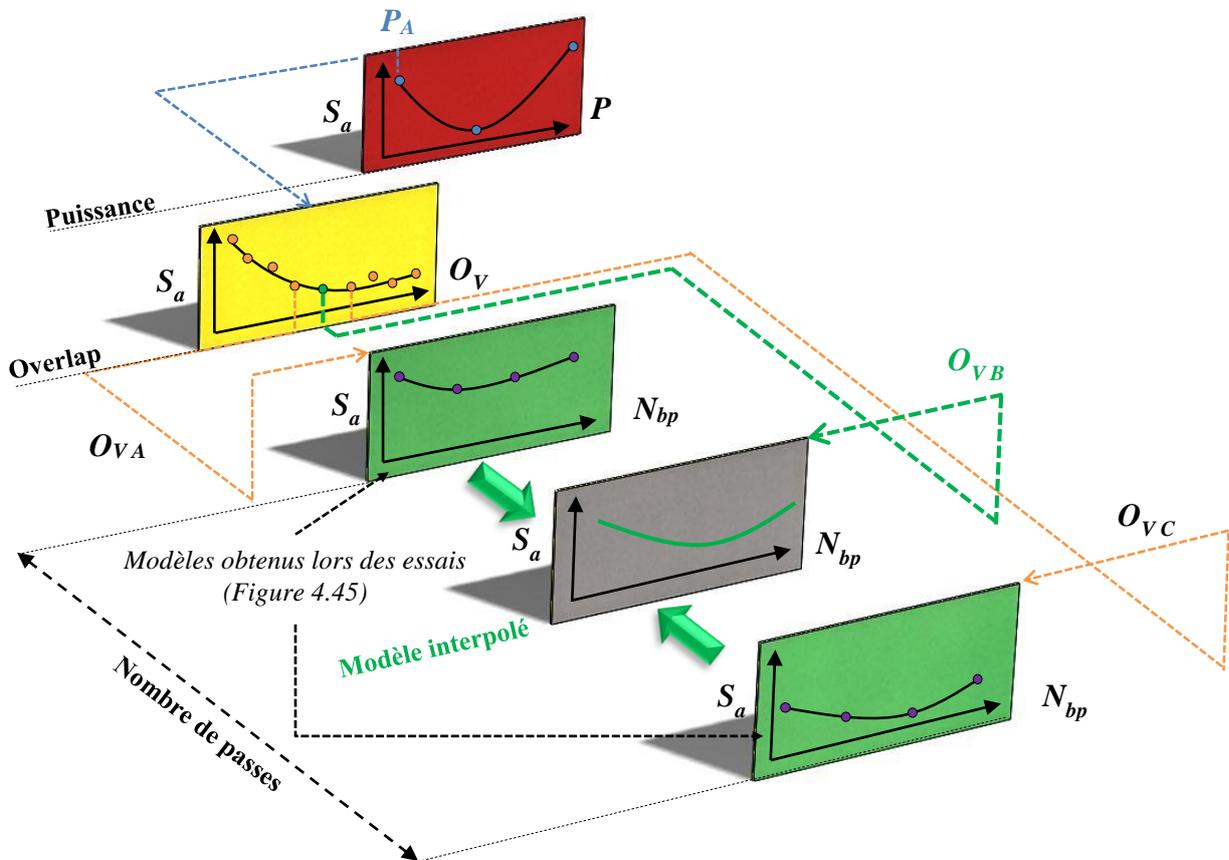


Figure 5.8: principe d'interpolation appliqué au nombre de passes pour un Overlap intermédiaire et une puissance testée expérimentalement

Le principe d'interpolation nécessite la connaissance des modèles qui bornent la nouvelle valeur désirée. Dans le cas où la puissance varie, il est nécessaire d'interpoler d'autres modèles en vue de déterminer le comportement du nombre de passes (Figure 5.9). La valeur opératoire de la puissance doit être répercutée sur l'Overlap et le nombre de passes.

De ce fait, chaque modèle comportemental du nombre de passes doit être lié à un comportement d'Overlap, lui-même lié à la nouvelle valeur de puissance souhaitée pour l'optimisation.

Ainsi, pour une nouvelle puissance, il est nécessaire de déterminer les comportements du nombre de passes pour deux valeurs opératoires d'Overlap. Ces deux comportements d'Overlap doivent être construits selon deux valeurs de puissances qui bornent la nouvelle valeur de P .

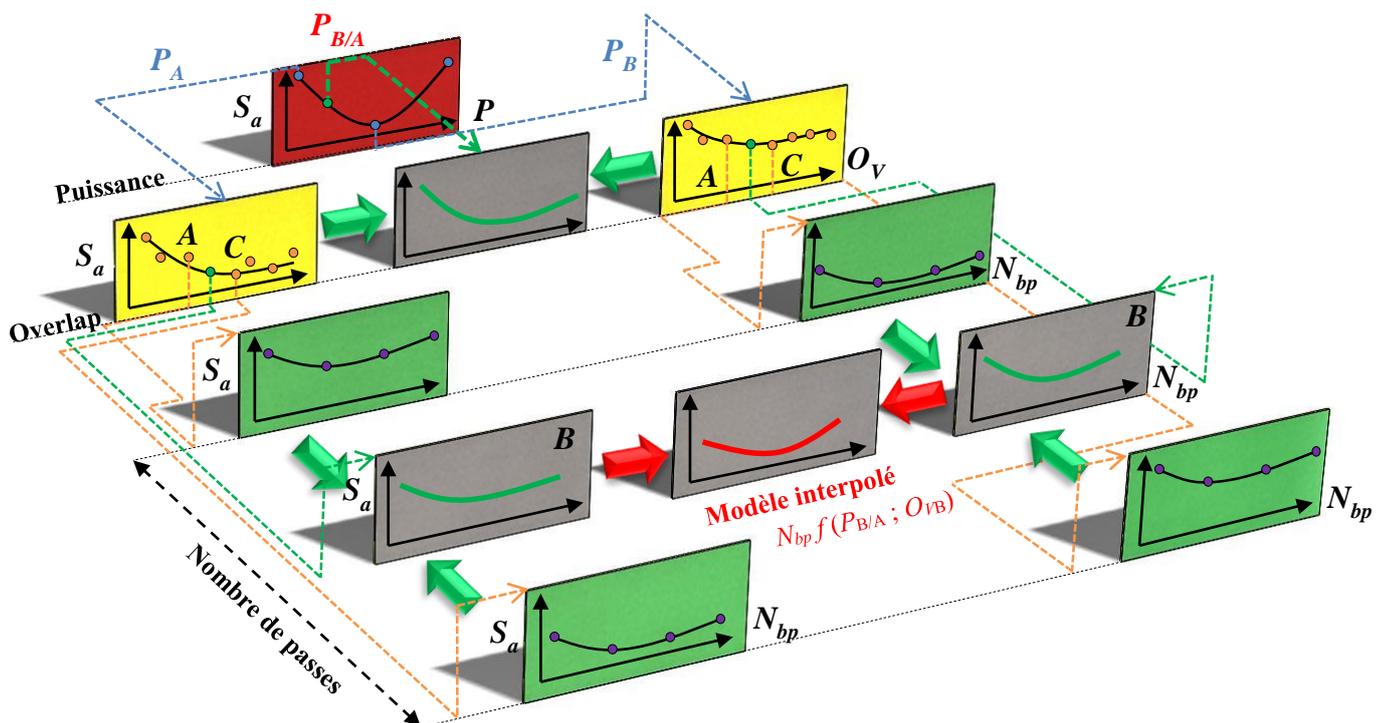


Figure 5.9: principe d'interpolation appliqué au nombre de passes pour une puissance intermédiaire

5.4.2 Application du principe d'interpolation

L'application de la méthodologie s'appuie sur une valeur d'avance optimale de 1500 mm/min. Cette avance permet d'optimiser le procédé quant à la productivité et l'intégrité de la surface.

Comme précisé précédemment, le principe d'interpolation ne nécessite pas la création de points expérimentaux supplémentaires, ce qui est un avantage industriellement parlant. Dans le cas étudié, l'objectif est de déterminer le comportement de l'Overlap pour des puissances intermédiaires aux essais expérimentaux. Compte tenu de la hiérarchisation d'optimisation, la seconde étape consiste à déterminer le comportement intermédiaire du nombre de passes, pour de nouvelles valeurs d'Overlap, et dans le cas d'une puissance de 105 W. La puissance de 105 W permet de limiter la déformation géométrique de la surface tout en garantissant une diminution de la rugosité surfacique.

Les résultats d'interpolation de l'Overlap pour des puissances intermédiaires de 130 et 180 W montrent une évolution cohérente du comportement de l'Overlap vis-à-vis de son comportement antérieur et postérieur (Figure 5.10).

Les modèles de comportement obtenus disposent d'une bonne corrélation avec les points interpolés. Le modèle polynomial de l'Overlap selon une puissance de 180 W est relativement proche de ses comportements voisins. Cette faible distance est directement causée par le comportement de la puissance, qui tend à se stabiliser autour de 205 W. Ainsi, les possibilités d'interpolations sont limitées par la discrétisation du paramètre de puissance et par son comportement.

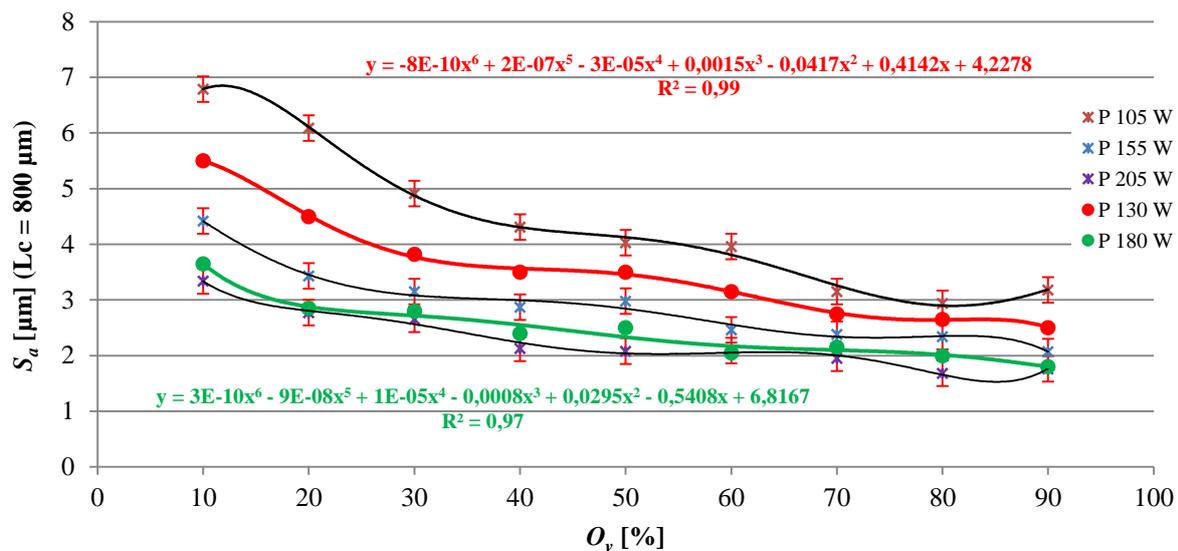


Figure 5.10: application du principe d'interpolation pour des puissances intermédiaires de 130 et 180 W dans le cas de l'optimisation de l'Overlap

L'application du principe d'interpolation reste identique concernant le paramètre du nombre de passes. L'interpolation permet de déterminer le comportement du nombre de passes pour de nouvelles valeurs d'Overlap de 30 et 60 % (Figure 5.11).

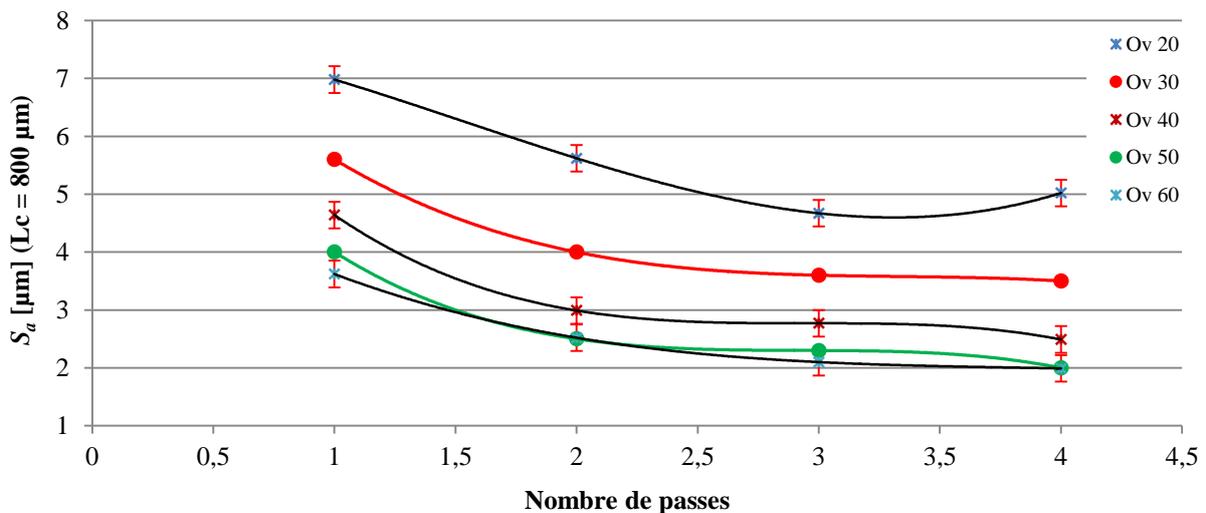


Figure 5.11: application du principe d'interpolation pour des Overlap de 30 et 50 % dans le cas de l'optimisation du nombre de passes ($P= 105\text{W}$)

5.5 Conclusion

La méthodologie proposée permet, à partir d'interpolation et sans essais supplémentaires, de déterminer les comportements des paramètres du procédé de polissage laser pour des valeurs opératoires non testées expérimentalement.

La méthodologie s'appuie sur une organisation hiérarchique des paramètres et prend en considération leurs interactions. Fonctionnel au sein du domaine de faisabilité, l'outil proposé permet de garantir l'absence de microfissures tout en obtenant le lissage de la topographie exigé par le cahier des charges.

Chapitre 6 : conclusion et perspectives

6.1	Conclusion	112
6.2	Perspectives	113

6.1 Conclusion

Compte tenu des limitations des procédés de polissage conventionnels, que ce soit en termes de productivité, de qualité ou sanitaire, le procédé de polissage laser est un procédé innovant qui permet de pallier certaines de ces problématiques.

Le macro-polissage permet d'obtenir une rugosité surfacique située entre 0,5 et 0,8 μm . Certains procédés de polissage conventionnels permettent d'atteindre des rugosités inférieures de l'ordre du centième de micron. Cependant, ces procédés ne sont pas forcément adaptés aux pièces de formes complexes et comportent des inconvénients.

Les présents travaux de thèse analysent le procédé de polissage laser avec deux procédés primaires, qui sont l'usinage et la fabrication directe par projection de poudres.

A travers l'ensemble des expérimentations et l'analyse de l'état de l'art, nous avons pu voir que le procédé de polissage laser est un procédé thermodynamique, qui grâce à la chaleur transmise par le faisceau laser et aux tensions de surfaces permet un lissage de la topographie initiale. Le temps d'interaction entre le laser et la topographie initiale est une variable primordiale. L'augmentation du temps d'interaction, et donc du temps de fonte, permet un meilleur écoulement de la matière et donc une meilleure propagation de celle-ci, ce qui engendre une amélioration du lissage.

La méthodologie d'investigation expérimentale entreprise dans le chapitre trois nous a permis de mettre en place un protocole utilisateur, en vue de déterminer les réglages optimaux des paramètres opératoires vis-à-vis de la contrainte du cahier des charges. Ce protocole s'articule autour de deux modèles statistiques et d'essais expérimentaux, et se divise selon deux stratégies de polissage. Le premier modèle de régression permet de déterminer les paramètres opératoires de hauteur de crête, de puissance, d'avance, d'offset et de taux de recouvrement pour une rugosité surfacique supérieure à $2,1 \pm 0,2 \mu\text{m}$. Le second modèle s'appuie sur les valeurs opératoires optimales, et permet grâce au modèle de comportement du taux de recouvrement, d'optimiser et prédire la rugosité surfacique pour des valeurs situées entre 2,1 et $0,94 \pm 0,2 \mu\text{m}$. Enfin, le protocole permet de déterminer les paramètres opératoires en vue d'obtenir un S_a de 0,5 μm et cela pour des paramètres optimaux, une hauteur de crête initiale maximale de 300 μm et une stratégie multi-passes.

Dans le chapitre quatre, nous avons montré que le polissage laser permet d'obtenir une rugosité surfacique optimale de 0,8 μm pour le 316L et 0,64 μm pour le TA6V. Grâce aux investigations expérimentales, nous avons déterminé le domaine de faisabilité du procédé et montré une hiérarchisation des paramètres opératoires quant à l'optimisation de la rugosité surfacique. Le domaine de faisabilité prend en considération la rugosité surfacique, l'intégrité de la surface, et permet de limiter la déformation géométrique.

Enfin, nous avons montré une corrélation entre les paramètres opératoires et la topologie de la pièce. Ainsi, dans une maîtrise du procédé de polissage laser, il est nécessaire de déterminer les valeurs des paramètres opératoires vis-à-vis de la topologie de la pièce à traiter.

Suite à la création de modèles comportementaux, nous avons mis en place une méthodologie de détermination des paramètres opératoires présentée dans le chapitre 5. Cette méthodologie s'intègre au sein du domaine de faisabilité et s'appuie sur la hiérarchisation des paramètres

opérateurs ainsi que sur une méthode d'interpolation. Cette méthodologie permet de prendre en considération les interactions des paramètres opératoires qui influencent le résultat final.

D'un point de vue général, les apports de ces travaux de recherche sont les suivants:

Polissage laser de pièces usinées :

- Prise en compte de la topographie initiale, de la puissance, de l'avance, de l'offset et du taux de recouvrement de passe dans un même modèle de prédiction.
- Optimisation du pourcentage de réduction de S_a de 99 %, pour une hauteur de crête initiale de 300 μm et un S_a final de 0,5 μm .
- Quantification de l'impact de la topographie initiale vis-à-vis de la puissance du laser.
- Mise en place d'un protocole de détermination des paramètres opératoires en fonction des contraintes du cahier des charges à partir de modèles statistiques et d'expérimentations suivant deux stratégies différentes.
- Modélisation du comportement du taux de recouvrement de passe.

Polissage laser de pièces obtenues par fabrication directe :

- Modélisation du comportement de la puissance, de l'avance, de l'offset, du taux de recouvrement et du nombre de passes.
- Optimisation de l'intégrité de la surface vis-à-vis des paramètres opératoires.
- Optimisation de la topographie finale pour des valeurs de S_a de 0,8 et 0,64 μm dans le cas du 316L et du TA6V.
- Etude de l'impact du rayon de courbure de la pièce.
- Mise en avant de l'impact des paramètres opératoires sur la déformation de la pièce dans le cas du polissage laser de sections minces.
- Hiérarchisation des paramètres opératoires.
- Proposition d'une méthodologie de détermination des paramètres opératoires vis-à-vis d'une hiérarchisation d'optimisation, basée sur un principe d'amélioration de la capacité de généralisation des modèles de comportement.

6.2 Perspectives

Ces travaux de thèse nous ont permis d'apporter des connaissances quant à la maîtrise du procédé de polissage laser. Cependant, dans une optique d'industrialisation du procédé, certains éléments technologiques et scientifiques nécessitent d'être développés à la suite de ces travaux.

Selon une approche technologique, nous avons vu une certaine limitation quant à l'utilisation d'un environnement maîtrisé dans le cas du polissage 5 axes. Il serait nécessaire de concevoir un **système de confinement** adapté aux mouvements du porteur afin de garantir une accessibilité optimale.

D'un point de vue scientifique, les perspectives à entreprendre concernent différents aspects.

Selon une vision industrielle, il est nécessaire de se concentrer sur la **productivité** du procédé. L'optimisation des temps de cycles permettrait de mieux susciter l'intérêt des industriels pour le procédé, ce contexte exigeant une certaine productivité. Dans ce cas, il serait judicieux d'étudier des avancées plus conséquentes dans le cas du polissage laser de pièces usinées.

Une autre piste d'investigation consisterait à traiter les surfaces de *formes complexes*, par l'analyse de la stratégie de polissage. Peu d'études se focalisent sur cet aspect qui est un point essentiel quant à la qualité finale et l'application du procédé.

D'un point de vue **cotation fonctionnelle**, il est nécessaire de prendre en compte l'impact du polissage laser afin de maîtriser cet aspect. Ainsi, il serait nécessaire de connaître la **profondeur de fonte** du procédé vis-à-vis des conditions opératoires afin de maîtriser la cotation finale de la pièce.

Dans une approche fonctionnelle de la surface finale, il serait pertinent de proposer des *modèles de simulation* capables de prédire l'amplitude, la répartition spatiale, mais aussi la texture de la topographie. Ces modèles de simulation pourraient se baser sur une méthodologie expérimentale, en vue de proposer rapidement une représentation visuelle du résultat.

Dans ces travaux de thèse, la puissance minimale étudiée ne permet pas de lisser la surface et engendre une *déformation géométrique*, ce qui laisse supposer une certaine limite du procédé de polissage laser quant au respect des tolérances géométriques dans le cas des sections minces. Afin de pallier cette problématique, il serait intéressant d'adapter la **stratégie de polissage** en fonction de la propagation thermique. Dans ce cas, à partir d'un modèle thermique, le laser pourrait traiter prioritairement certaines zones en vue de limiter l'apport de chaleur et donc la déformation.

En termes d'optimisation du lissage, il est à présent nécessaire d'éliminer la *texture « peau d'orange »* engendrée par la topographie initiale. Ce type de texture anisotrope, impacte sur le comportement tribologique de la surface mais aussi sur son aspect esthétique.

Les futures investigations doivent aussi se concentrer sur l'*intégrité* et la *résistance mécanique* des surfaces. En vue de qualifier fonctionnellement les pièces polies par laser, il serait nécessaire d'étudier la résistance à la corrosion ainsi que la tenue en fatigue des pièces polies.

Afin d'élargir l'application du procédé il sera nécessaire d'étudier d'autres matériaux, tels que les *matériaux à gradients continus*, qui suscitent un intérêt fonctionnel et sont cohérents avec les avantages de la fabrication directe par projection de poudres. Ces variables pièces pourraient être imbriquées dans la méthodologie proposée dans cette thèse, et bénéficier du principe d'interpolation en vue de généraliser le procédé selon une vision globale de fabrication.

Enfin, les *procédés de fabrication* sont dans la majeure partie des cas analysés suivant une approche qualitative et productive, au regard de la fonctionnalité des pièces produites. Les procédés innovants impactent sur ces contraintes industrielles, mais aussi sur d'autres aspects. Le procédé de polissage laser permet d'améliorer les *conditions sanitaires* des opérateurs, qui développent des pathologies musculo-squelettiques lors des opérations de polissage manuel, ce qui montre un autre impact du procédé. Les procédés de fabrication innovants, peuvent aussi avoir des *répercussions sociétales*, ce qui est très rarement pris en considération dans les études. Il serait intéressant de porter un regard quantitatif sur cet aspect, afin de mesurer quel est réellement l'apport global de ces nouveaux procédés de fabrication.

Bibliographie

Par ordre alphabétique

A.....

[Avilès2011]: R. Avilès, J. Albizuri, A. Lamikiz, E. Ukar, and a. Avilès, “Influence of laser polishing on the high cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel,” *Int. J. Fatigue*, vol. 33, no. 11, pp. 1477–1489, Nov. 2011.

B.....

[Bol’shepaev1997]: O.Y. Bol’shepaev and N. N. Katomin, “laser polishing of glass articles” *Glass and ceramics*, vol. 54, pp. 141–142, 1997.

[Brevet WO2013079725]: HASCOET Jean-Yves, CARABIN Gilles, MOGNOL Pascal, Procédés et dispositifs d’usinage par addition de matière et mise en forme combinée, décembre 2012.

C.....

[Chow2012]: M. T. C. Chow, E. V. Bordatchev, and G. K. Knopf, “Experimental study on the effect of varying focal offset distance on laser micro-polished surfaces,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Dec. 2012.

[Chow2010]: Chow, M. T. C.; H., A. M. Khalid; Tutunea-Fatan, O. R.; Knopf, G. K.; Bordatchev, E. V., “NRC Publications Archive (NPArc) Archives des publications du CNRC (NPArc) “Experimental statistical analysis of laser micro-polishing process.”

E.....

[Erdemir1997]: A. Erdemir, M. Halter, G. R. Fenske, A. Krauss, D. M. Gruen, S. M. Pimenov, and V. I. Konov, “Durability and tribological performance of smooth diamond films produced by Ar-C60 microwave plasmas and by laser polishing,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 94–95, pp. 537–542, Oct. 1997.

G.....

[Gharbi2013]: M. Gharbi, P. Peyre, C. Gorny, M. Carin, S. Morville, P. Le Masson, D. Carron, and R. Fabbro, “Influence of various process conditions on surface finishes induced by the direct metal deposition laser technique on a Ti–6Al–4V alloy,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213, no. 5, pp. 791–800, May 2013.

[Gharbi2014]: M. Gharbi, P. Peyre, C. Gorny, M. Carin, S. Morville, P. Le Masson, D. Carron, and R. Fabbro, “Influence of a pulsed laser regime on surface finish induced by the direct metal deposition process on a Ti64 alloy,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, no. 2, pp. 485–495, Feb. 2014.

[Gisario2011]: A. Gisario, A. Boschetto, and F. Veniali, “Surface transformation of AISI 304 stainless steel by high power diode laser,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 49, no. 1, pp. 41–51, Jan. 2011.

[Gloor1999]: S.Gloor, W. Lüthy, H.P. Weber, S.M. Pimenov, V.G. Ralchenko, V.I. Konov and A.V. Khomich, “UV laser polishing of thick diamond films for IR windows,” *Applied Surface Science*, Vol. 138-139, pp. 135–139, Jan. 1999.

[Guiot2012]: Thèse de doctorat, Modélisation et simulation du procédé de prépolissage automatique sur centre d’usinage 5 axes, 2012.

J.....

[JCGM2008]: Evaluation des données de mesure. Guide pour l’expression de l’incertitude de mesure. 2008.

K.....

[Khalid Hafiz2012]: A. M. Khalid Hafiz, E. V. Bordatchev, and R. O. Tutunea-Fatan, “Influence of overlap between the laser beam tracks on surface quality in laser polishing of AISI H13 tool steel,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 14, no. 4, pp. 425–434, Oct. 2012.

[Khalid Hafiz2012]: A. M. K. Khalid Hafiz, E. V. Bordatchev, and R. O. Tutunea-Fatan, “Influence of overlap between the laser beam tracks on surface quality in laser polishing of AISI H13 tool steel,” *J. Manuf. Process.*, vol. 14, no. 4, pp. 425–434, Oct. 2012.

[Kumstel2013]: J. Kumstel and B. Kirsch, “Polishing Titanium- and Nickel-based Alloys using Cw-Laser Radiation,” *Phys. Procedia*, vol. 41, pp. 355–364, Jan. 2013.

[Lambarri2013]: J. Lambarri, J. Leunda, C. Soriano, and C. Sanz, “Laser Surface Smoothing of Nickel-based Superalloys,” *Phys. Procedia*, vol. 41, pp. 255–265, Jan. 2013.

L.....

[Lamikiz2006]: A. Lamikiz, J. a. Sánchez, L. N. López de Lacalle, D. del Pozo, and J. M. Etayo, “Surface Roughness Improvement Using Laser-Polishing Techniques,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 526, pp. 217–222, 2006.

[Lamikiz2007]: A.Lamikiz, J. Sanchez, L. Lopezdelacalle, and J. Arana, “Laser polishing of parts built up by selective laser sintering,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 47, no. 12–13, pp. 2040–2050, Oct. 2007.

[Landau1959]: Landau LD, Lifshitz EM, editors. Fluid mechanics. Pergamon Press; 1959.

[Lin1996]: R. Lin and Y. Koren, “Efficient Tool-Path Planning for Machining Free-Form Surfaces,” vol. 118, no. FEBRUARY, 1996.

M.....

[Ma2013]: C. Ma, M. Vadali, N. a. Duffie, F. E. Pfefferkorn, and X. Li, “Melt Pool Flow and Surface Evolution During Pulsed Laser Micro Polishing of Ti6Al4V,” *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 135, no. 6, p. 061023, Nov. 2013.

[Marinescu2008]: Marinescu, N. I.; Ghiculescu, D., Jitianu, G. & Seritan, G. “Improvement of technological parameters at surface finishing through laser beam,” 6th international DAAAM Baltic Conference Industrial Engineering, no. April, pp. 2–7, 2008, Estonie.

[Marinescu2007]: N. I. Marinescu, D. Ghiculescu, R. D. Marinescu, and C. Anger, “Some results concerning laser finishing of tools steels” Nonconventional Technologies Review – no. 3 / 2007, *Rev. Lit. Arts Am.*, no. 3, pp. 53–58, 2007.

[Muller2013]: Pierre Muller, Pascal Mognol and Jean-Yves Hascoët “Modeling and control of a direct laser powder deposition process for Functionally Graded Materials (FGM) parts manufacturing”, *journal of materials processing technology*, vol. 213, pp. 685-692, 2013.

N.....

[Norme NF EN ISO 25178-2]: Spécification géométrique des produits (GPS). Etat de surface : surfacique. Partie 2 : termes, définitions et paramètres d'état de surface. 2012.

[Norme NF EN ISO 4288]: Spécification géométrique des produits (GPS). Etat de surface : méthode du profil- Règles et procédures pour l'évaluation de l'état de surface. 1998.

[Norme BS EN ISO 21534]: Non-active surgical implants, joint replacement implants, particular requirements, 2007.

[Norme NF E 67-001]: Fabrication additive, vocabulaire, 2011.

[Nowak2006]: K.M. Nowak, H. J. Baker and D.R. Hall, “Efficient laser polishing of silica micro-optic components,” *applied optics*, vol 45, issue 1, pp. 162-171, 2006.

[Nüsser2013]: C. Nüsser, H. Sändker, and E. Willenborg, “Pulsed Laser Micro Polishing of Metals using Dual-beam Technology,” *Phys. Procedia*, vol. 41, pp. 346–355, Jan. 2013.

[Nüsser2011]: C. Nüsser, I. Wehrmann, and E. Willenborg, “Influence of Intensity Distribution and Pulse Duration on Laser Micro Polishing,” *Phys. Procedia*, vol. 12, pp. 462–471, Jan. 2011.

P.....

[Perry2009a]: T. L. Perry, D. Werschmoeller, X. Li, F. E. Pfefferkorn, and N. a. Duffie, “The Effect of Laser Pulse Duration and Feed Rate on Pulsed Laser Polishing of Microfabricated Nickel Samples,” *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 131, no. 3, p. 031002, 2009.

[Perry2009b]: Tyler L. Perry, Dirk Werschmoeller, Xiaochun Li, Frank E. Pfefferkorn, Neil A. Duffie, “Pulsed laser polishing of micro-milled Ti6Al4V samples”, *Journal of Manufacturing Processes*, pp.74-81, 2009.

[Perry2007]: T. L. Perry, D. Werschmoeller, X. Li, F. E. Pfefferkorn, and N. A. Duffie, “Micromelting for laser micro polishing of meso/micro metallic components”, *International Manufacturing Science And Engineering Conference*, pp. 1–7, 2007.

[Pfefferkorn2013]: F. E. Pfefferkorn, N. a. Duffie, X. Li, M. Vadali, and C. Ma, “Improving surface finish in pulsed laser micro polishing using thermocapillary flow,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 62, no. 1, pp. 203–206, Jan. 2013.

R.....

[Ramos2002a]: J.A. Ramos, D.L. Bourell and J.J. Beaman “Surface over-melt during laser polishing of indirect-SLS Metal parts”, materials research society symposium proceedings, vol. 758, Dec 2002.

[Ramos2002b]: J. A. Ramos, D. L. Bourell, and J. J. Beaman, “Surface Characterization of Laser Polished Indirect-SLS Parts,” pp. 554–562, conference paper, 13th solid freeform fabrication symposium, 2002.

[Ramos2001]: J. A. Ramos, J. Murphy, K. Wood, D. L. Bourell, and J. J. Beaman, “Surface Roughness Enhancement of Indirect-SLS Metal Parts by Laser Surface Polishing,” *proceeding of the 12th solid freeform fabrication symposium*, pp. 28-38, Austin, Texax, 2001.

[Rauch2012]: M. Rauch, R. Laguionie, J.-Y. Hascoet, and S.-H. Suh, “An advanced STEP-NC controller for intelligent machining processes,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 28, no. 3, pp. 375–384, Jun. 2012.

[Rombouts 2013]: M. Rombouts, G. Maes, W. Hendrix, E. Delabre and F. Motmans, “Surface finish after laser metal deposition,” Laser in Manufacturing conference, Physics Procedia 41, pp. 803-807, 2013.

S.....

[Shao2005]: T. M. Shao, M. Hua, H. Y. Tam, and E. H. M. Cheung, “An approach to modelling of laser polishing of metals,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 197, no. 1, pp. 77–84, Jul. 2005.

T.....

[Temmler2011]: A. Temmler, E. Willenborg, and K. Wissenbach, “Design Surfaces by Laser Remelting,” *Phys. Procedia*, vol. 12, pp. 419–430, Jan. 2011.

[Tuckerman1986]: D. B. Tuckerman and a. H. Weisberg, “Planarization of gold and aluminum thin films using a pulsed laser,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–4, Jan. 1986.

U.....

[Ukar2009]: E. Ukar, A. Lamikiz, L. N. López de Lacalle, D. del Pozo, and J. L. Arana, “Laser polishing of tool steel with CO2 laser and high-power diode laser,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 50, no. 1, pp. 115–125, Jan. 2010.

[Ukar2010a]: E. Ukar, A. Lamikiz, L. N. López de Lacalle, F. Liebana, J. M. Etayo, and D. del Pozo, “Laser Polishing Operation for Die and Moulds Finishing,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 83–86, pp. 818–825, Dec. 2009.

[Ukar2010b]: E. Ukar, a. Lamikiz, L. N. López de Lacalle, S. Martinez, and F. Liébana, “Thermal model with phase change for process parameter determination in laser surface processing,” *Phys. Procedia*, vol. 5, pp. 395–403, 2010.

[Ukar2012]: E. Ukar, a. Lamikiz, S. Martínez, I. Tabernero, and L. N. L. De Lacalle, “Roughness prediction on laser polished surfaces,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, no. 6, pp. 1305–1313, Jun. 2012.

[Ukar2013]: E. Ukar, A. Lamikiz, S. Martínez, F. Estalayo, and I. Tabernero, “Laser Polishing of GGG70L Cast Iron with 2D Scan-head,” *Procedia Eng.*, vol. 63, pp. 53–59, Jan. 2013.

V.....

[Vadali2011]: M. Vadali, C. Ma, N. A. Duffie, X. Li, and F. E. Pfefferkorn, “Pulsed Laser micro Polishing : Surface Prediction Model,” 2011, ICOMM N°80

[Vadali2012]: M. Vadali, C. Ma, N. a. Duffie, X. Li, and F. E. Pfefferkorn, “Pulsed laser micro polishing: Surface prediction model,” *J. Manuf. Process.*, vol. 14, no. 3, pp. 307–315, Aug. 2012.

[Vadali2013]: M. Vadali, C. Ma, X. Li, F. E. Pfefferkorn, and N. A. Duffie, “Irregular , Adaptive Scan Trajectories for Pulsed Laser Micro Polishing,” pp. 226–232, 2013.

W.....

[Whitehouse2003]: Whitehouse DJ. Handbook of surface and nanometrology. Bristol: institute of physics publishing; 2003.

[Willenborg2007]: E. Willenborg, “Polishing with Laser Radiation,” *Kunststoffe international*, vol. 97, no.6, 2007, pp. 37-39

Thèse de Doctorat

Benoit ROSA

Modélisation du polissage laser de pièces obtenues suivant les procédés primaires d'usinage et de fabrication directe Modeling of laser polishing of parts built up by the milling and additive manufacturing primary processes

Résumé

En vue d'atteindre la qualité fonctionnelle dictée par le cahier des charges, une pièce mécanique nécessite la réalisation de plusieurs opérations. Ainsi, la chaîne manufacturière est composée de différents procédés de fabrication. Les procédés primaires permettent l'obtention de surfaces, qui pour des fonctions esthétiques ou tribologiques nécessitent la réalisation d'opérations de parachèvement. Les procédés de polissage conventionnels disposent d'inconvénients qualitatifs, productifs, environnementaux ou sanitaires, et en vue de pallier ces différentes problématiques tout en améliorant la qualité des surfaces, le procédé de polissage laser est investigué.

Ces travaux de thèse s'intègrent dans un contexte global de fabrication par l'investigation du procédé de polissage laser en fonction de deux procédés primaires : l'usinage et la fabrication directe.

Dans une optique de maîtrise, et à partir d'investigations expérimentales et de modèles comportementaux, ces travaux permettent de proposer un protocole ainsi qu'une méthodologie de détermination des paramètres opératoires. Efficaces au sein des domaines de faisabilité et optimal, les outils proposés prennent en considération différentes fonctions objectif qualitatives. Aussi, compte tenu des avantages de la fabrication directe, ces travaux de thèse investiguent le polissage laser de pièces de formes complexes et de sections minces.

Les paramètres optimaux déterminés permettent d'obtenir une réduction de rugosité surfacique de 99%. Enfin, la méthodologie d'investigation souligne l'importance de la topologie de la pièce lors du choix des paramètres opératoires.

Mots clés

Polissage laser, fabrication directe, usinage, expérimentations, modélisation, optimisation, méthodologie, topographies initiale et finale.

Abstract

In order to reach the functional quality imposed by specifications, a mechanical part needs several operations. Thereby, the manufacturing chain is composed by different processes. The primary processes enable to create surfaces, and for aesthetic or tribological functions these surfaces need a finishing operation. Conventional polishing processes hold some drawbacks in terms of quality, productivity, environment and health. In order to overcome these limitations, the laser polishing process is investigated.

These thesis works take place into a global manufacturing chain context, with the investigation of laser polishing according to two primary processes: machining and direct metal deposition process.

In order to master the laser polishing process, these works enable to propose a protocol and a methodology for the determination of laser polishing parameters, efficient into the feasibility and optimal domains. Based on behavior models obtained through experimentations, these tools take into consideration several qualitative objective functions. Moreover, regarding advantages of additive manufacturing process, these research works investigate laser polishing of complex and thin parts.

The optimal parameters enable to obtain 99% of surface roughness reduction. Lastly, the methodology of investigation highlights the impact of part topology when choosing the laser polishing parameters.

Key Words

Laser polishing, direct metal deposition, machining, experimentations, modeling, optimization, methodology, initial and final topographies.