

Filière Systèmes industriels

Orientation Design & Materials

Travail de bachelor Diplôme 2021

Arnaud Gillioz

*Post-traitement des pièces métalliques
fabriquées par SLM par tribofinition*

- Professeur
Dr. Haifa Sallem
- Expert
Stéphane Chagnard
- Date de la remise du rapport
20.08.2021

Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.
Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.

SYND	ETE	TEVI
X	X	X

Filière / Studiengang SYND	Année académique / Studienjahr 2020/21	No TD / Nr. DA DM/2021/26
Mandant / Auftraggeber <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire <i>Partnerinstitution</i>	Etudiant / Student Arnaud Gillioz Professeur / Dozent Haïfa Sallem	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire <i>Partnerinstitution</i>
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit <input type="checkbox"/> oui / ja ¹ <input checked="" type="checkbox"/> non / nein	Expert / Experte (données complètes)	

Titre / Titel

Post-traitement des pièces métalliques fabriquée par SLM par tribofinition

Description / Beschreibung


La fabrication additive laser sur lit de poudre (SLM) permet de produire des composants fonctionnels caractérisés par des géométries complexes. Cependant, la qualité de surface obtenue est insuffisante pour la plupart des applications en aérospatial ou en biomédical ce qui nécessite souvent un post traitement. La tribofinition est un candidat intéressant. Il s'agit d'une opération de finition de masse capable de conditionner les pièces au moyen d'une action mécanique douce fournie par un flux granulaire, mais ce procédé est souvent appliqué sans critères cohérents visant à trouver des paramètres de traitement. Le but de ce projet sera de mettre en place une méthodologie permettant la maîtrise et l'optimisation du procédé de tribofinition des pièces issues de la fabrication additive.

Les étapes suivantes sont requises :

- Dresser l'état de l'art sur la problématique exposée
- Proposer une stratégie expérimentale permettant l'étude paramétrique du procédé de tribofinition
- Mettre en place un banc d'essai fonctionnel de tribofinition adapté au posttraitement des pièces fabriquées par SLM
- Imprimer les pièces et les post-traiter
- Caractériser et analyser l'état de surface final
- Trouver une combinaison de paramétrie optimisée

Objectifs / Ziele

- Mise en place d'un banc d'essai fonctionnel de tribofinition adapté au posttraitement des pièces imprimées par SLM
- Etablir les règles permettant la maîtrise de ce procédé
- Comprendre et analyser l'impact de l'opération de tribofinition sur l'intégrité des pièces.

Signature ou visa / Unterschrift oder Visum Responsable de l'orientation / filière <i>Leiter der Vertiefungsrichtung / Studiengang:</i>  ¹ Etudiant / Student : 	Délais / Termine Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags: 10.05.2021 Présentation intermédiaire / Zwischenpräsentation 07 – 08.06.2021 Remise du rapport / Abgabe des Schlussberichts: 20.08.2021, 12:00 Exposition / Ausstellung der Diplomarbeiten: 25 – 27.08.2021 (si autorisé / falls genehmigt) Défense orale / Mündliche Verfechtung: 30.08 – 09.09.2021
--	--

¹ Par sa signature, l'étudiant-e s'engage à respecter strictement la directive DI.1.2.02.07 liée au travail de diplôme.
Durch seine Unterschrift verpflichtet sich der/die Student/in, sich an die Richtlinie DI.1.2.02.07 der Diplomarbeit zu halten.

Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.
Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.



Post-traitement des pièces métalliques fabriquées par SLM par tribofinition

Diplômant/e Arnaud Gillioz

Objectif du projet

Comprendre et analyser l'impact du procédé de tribofinition sur des pièces imprimées par fusion laser sélective (SLM). Cette analyse doit permettre de définir quelques règles permettant de maîtriser ce procédé.

Méthodes | Expériences | Résultats

L'impression de 30 éprouvettes en acier 316L par procédé SLM a servi à analyser l'impact du procédé de tribofinition.

Tout d'abord, une approche expérimentale traditionnelle a permis d'étudier l'évolution de la topographie des éprouvettes en fonction du temps. Les pics de rugosité ont été abrasés, sans que les creux ne soient affectés. Cependant, sur les surfaces très grossières, la rugosité n'a pas pu être réduite à un niveau comparable aux procédés d'usinage conventionnel. Sur les faces supérieures en particulier, les sillons laissés par le laser n'ont pas pu être éliminés, et ce malgré un cycle de 4h.

De plus, la hauteur des pics décroît exponentiellement jusqu'à atteindre une limite, qui peut parfois être très élevée.

Dans un deuxième temps, une approche de type DOE a été sélectionnée afin d'évaluer l'influence de quatre facteurs et leurs interactions sur la réduction du paramètre S_p (hauteur de crête maximale).

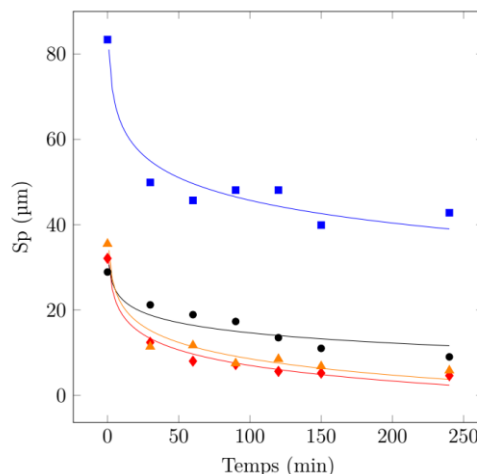
En définitive, la machine utilisée suffit à obtenir des rugosités inférieures à $S_a 3\mu\text{m}$ sur les pièces qui, à l'état brut, sont peu rugueuses. En revanche, elle manque d'énergie pour traiter de manière efficace les pièces plus grossières.

Travail de diplôme
 | édition 2021 |

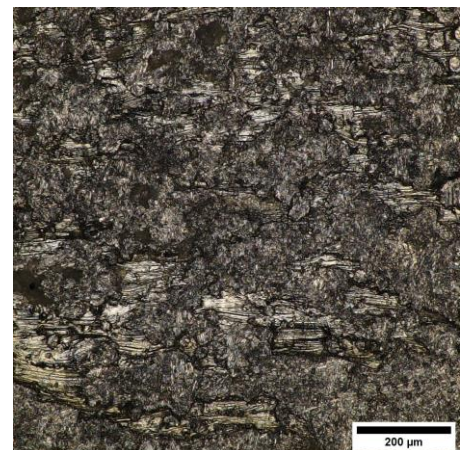
Filière
 Systèmes Industriels

Domaine d'application
 Design & Materials

Professeur responsable
 Dr. Haifa Sallem
 haifa.sallem@hevs.ch



Evolution de la hauteur de crête maximale (S_p) en fonction du temps de cycle



Surface obtenue après 4h de post-traitement, $R_a 1.6\mu\text{m}$

Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.
Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier Dr. Haifa Sallem en tant que responsable de ce projet. En outre, je remercie toutes les personnes sans qui ce travail de diplôme n'aurait pas pu être mené à bien :

- M. Hervé Girard pour son aide précieuse, en particulier concernant les analyses au microscope
- Dr. Samuel Rey-Mermet pour ses conseils et sa disponibilité
- Mme. Adeline Cinna et M. Jean Pralong pour l'impression des éprouvettes et leurs conseils avisés concernant la machine SLM
- M. Stéphane Chagnard en sa qualité d'expert et pour ses conseils concernant le procédé de tribofinition
- M. Cédric Clivaz pour s'être chargé des commandes et du déménagement du matériel

Table des matières

Acronymes	vii
Glossaire	viii
1 Introduction	1
1.1 Contexte	1
1.2 Objectifs	1
1.3 Structure du rapport	2
2 Bases théoriques	3
2.1 Procédé SLM	3
2.1.1 Généralités	3
2.1.2 Fonctionnement de la machine SLM	4
2.1.3 Domaines d'application	5
2.1.4 Limites du procédé	6
2.2 Post-traitement des pièces issues de la FA	7
2.3 Procédé de vibrofinition	8
2.3.1 Généralités	8
2.3.2 Le vibreur circulaire	10
2.3.3 Attraits du procédé	11
2.3.4 Médias	12
2.3.5 Lubrification	14
2.4 Plans d'expériences	14
2.4.1 Généralités	14
2.4.2 Types de plans	16
3 Revue de littérature sur le procédé de vibrofinition	17
3.1 Mouvement de la charge	17
3.2 Action abrasive	18
3.3 Paramètres du procédé	22
3.3.1 Variables clés	22
3.3.2 Forme et taille des médias	22
3.3.3 Taux de remplissage de la cuve	24
3.3.4 Solution lubrifiante	25
3.3.5 Fréquence de vibration	26
3.3.6 Amplitude des vibrations	26

3.3.7	Accélération de la cuve	26
3.4	Modélisation analytique du procédé	27
3.5	Procédés dérivés	28
3.6	Synthèse	28
4	Eprouvettes de test	30
4.1	Conception	30
4.2	Impression des spécimens	30
4.2.1	Stratégie d'impression	30
4.2.2	Machine SLM	31
4.2.3	Poudre	32
4.2.4	Paramètres d'impression	33
5	Equipement de tribofinition	34
5.1	Machine de tribofinition	34
5.2	Médias	34
5.3	Additif	35
6	Microscopie	36
6.1	Microscope numérique	36
6.2	Mesures de rugosité	36
6.3	Paramètres de rugosité surfacique	36
7	Résultats et discussion	38
7.1	Variation de la topographie des pièces	38
7.1.1	Déroulement des essais	38
7.1.2	Résultats	38
7.2	Influence des paramètres du procédé	48
7.2.1	Déroulement des essais	48
7.2.2	Résultats	52
8	Conclusion	55
	Bibliographie	57
	Annexes	60
	A Résultats des essais	61
	B Evolution des paramètres de rugosité	63
	C Evolution des surfaces	67

Table des figures

2.1	Paramètres associés à la densité d'énergie [5]	3
2.2	Nomenclature des pièces issues de la FA [1]	4
2.3	Schéma de fonctionnement de la machine SLM [1]	4
2.4	Supports de type bloc [7]	5
2.5	Effet de l'angle d'inclinaison des pièces sur la température [7]	5
2.6	Topographie de surface typique d'une pièce fabriquée par procédé SLM [14]	6
2.7	Principe de l'effet d'escalier [1]	7
2.8	Procédés de post-traitement utilisés pour les pièces issues de la FA [10] . .	8
2.9	Machines de tribofinition	9
2.10	Machine vibratoire multi-spires pour fonctionnement en continu (Rotomatic R210-27 SE) [26]	10
2.11	Schéma de principe du vibreur circulaire [28]	11
2.12	Illustration de certains effets observés sur les pièces traitées par tribofinition [18]	12
2.13	Différents médias céramiques [32]	13
2.14	Représentation d'un procédé sous forme de boîte noire [35]	15
2.15	Approche OVAT (gauche) et DOE (droite) [37]	15
3.1	Schéma du mouvement de la charge [23]	17
3.2	Courbe tracée par la charge en mouvement avec, pour chaque tour de rigole, 10 tonneaux (gauche) et 5 tonneaux (droite) [27]	18
3.3	Surface brute d'une pièce en AlSi10Mg fabriquée par SLM (haut) et surface obtenue après 40h de post-traitement dans un vibreur circulaire (bas) [12]	19
3.4	Modes de contact pièces-médias [28]	20
3.5	Mécanismes d'abrasion [21]	21
3.6	Observations au MEB de différents types de contacts [19] [28]	21
3.7	Paramètres du procédé de vibrofinish [18]	22
3.8	Catalogue de médias céramiques ABC SwissTech [22]	23
3.9	Vue en coupe d'un vibreur circulaire montrant le volume théorique (en vert) et le volume de travail effectif (en orange) [39]	24
4.1	Géométrie, dimensions et dénomination des éprouvettes	30
4.2	Stratégie de fabrication, direction d'impression selon Z (30 pièces)	31
4.3	Machine SLM 125HL [44]	32
5.1	Médias SCT MGA 15	34

5.2	Géométrie et dimensions du média abrasif	35
6.1	Illustration du paramètre de surface Sp [45]	37
6.2	Illustration du paramètre de surface Sa [45]	37
7.1	Faces de l'éprouvette avant post-traitement (gauche) et après 240 min (droite), images de l'essai n° 2	40
7.2	Evolution du paramètre Sp en fonction du temps de cycle	41
7.3	Evolution du paramètre Sv en fonction du temps de cycle	42
7.4	Evolution du paramètre Sa en fonction du temps de cycle	44
7.5	Evolution du rayon d'arête en fonction du temps de cycle	45
7.6	Evolution de l'arête étudiée	47
7.7	Surfaces étudiées	51
7.8	Interaction vitesse/état de surface (les autres variables sont à leur valeurs moyennes)	53
7.9	Effets principaux des facteurs (les autres variables sont à leur valeurs moyennes)	54
B.1	Evolution du paramètre Sp en fonction du temps de cycle	64
B.2	Evolution du paramètre Sv en fonction du temps de cycle	65
B.3	Evolution du paramètre Sa en fonction du temps de cycle	66
C.1	Evolution de la face supérieure	68
C.2	Evolution de la face <i>upskin</i>	69
C.3	Evolution de la face <i>downskin</i>	70
C.4	Evolution de la face latérale	71

Liste des tableaux

4.1	Caractéristiques de la poudre	32
4.2	Composition chimique de la poudre	32
4.3	Paramètres d'impression	33
7.1	Facteurs et niveaux	48
7.2	Matrice expérimentale	49
7.3	Table ANOVA	52

Acronymes

ANOVA Analysis of Variance.

CAO Conception Assistée par Ordinateur.

DMLM Direct Metal Laser Melting.

DOE Design of Experiments.

FA Fabrication Additive.

L-PBF Laser-Powder Bed Fusion.

MEB Microscope Electronique à Balayage.

OFAT One Factor at A Time.

OVAT One Variable at A Time.

SLM Selective Laser Melting.

Glossaire

Effet d'entaille Variation de la section d'une pièce créant une concentration de contraintes.

Facteur Variables d'entrée contrôlables, par exemple la fréquence de vibration de la cuve.

Near-net-shape Technique de fabrication permettant de produire des pièces proches de leur géométrie finale.

Niveau Valeur assignée à un facteur lors d'un essai.

Optimisation topologique Technique itérative faisant usage d'un logiciel pour optimiser la forme d'une pièce selon un critère défini, par exemple la masse.

Plan optimal Type de plan généré par un algorithme selon un critère d'optimalité précis.

Remelting Stratégie d'impression où une surface imprimée est exposée à un second passage du laser.

Réponse Grandeur physique déterminée par les niveaux des facteurs, par exemple la dureté de surface des pièces.

STL Format de fichier utilisé par les logiciels d'impression 3D.

Taux d'enlèvement de matière Volume de matière enlevé par unité de temps, exprimé par exemple en cm^3/min .

Variation focale Technique de mesure optique faisant usage de la distance focale de l'objectif pour cartographier une surface.

1 | Introduction

1.1 Contexte

Les techniques de fabrication additive (FA) permettent de fabriquer des pièces à forte valeur ajoutée et à la géométrie complexe, sans pour autant augmenter les coûts [1] [2]. Avec l'utilisation de ces procédés nouveaux, la chaîne logistique peut être considérablement raccourcie en éliminant certaines étapes de production et en réduisant le nombre de composants dans les assemblages [2].

Du fait de la flexibilité permise par la fabrication additive, le procédé est particulièrement attrayant pour les industries aérospatiale et médicale [3]. Cependant, les surfaces des pièces issues de fabrication additive sont caractérisées par une rugosité élevée ; or les composants destinés aux applications spatiales et médicales requièrent un état de surface irréprochable.

Par conséquent, de telles pièces nécessitent souvent un post-traitement. Les techniques d'usinage conventionnel étant peu adaptées aux géométries complexes, les utilisateurs des procédés de fabrication additive doivent donc se tourner vers d'autres techniques de finition.

La tribofinition est utilisée depuis des décennies pour des opérations de polissage et d'ébavurage. Récemment, le procédé a suscité l'attention pour sa capacité à améliorer l'état de surface des pièces produites par SLM (Selective Laser Melting). Cependant, la relation entre les entrées et la sortie du procédé est très mal comprise ; le choix des paramètres du procédé repose essentiellement sur l'expertise des fournisseurs et sur l'expérimentation.

1.2 Objectifs

Le présent travail s'inscrit dans ce contexte et a les objectifs suivants :

- Mettre en place un banc d'essai fonctionnel de tribofinition adapté au post-traitement des pièces imprimées par SLM
- Etablir les règles permettant la maîtrise de ce procédé
- Comprendre et analyser l'impact de l'opération de tribofinition sur l'intégrité des pièces

Le but de ce rapport est de détailler le chemin parcouru et présenter les résultats obtenus.

1.3 Structure du rapport

Après avoir posé les bases théoriques nécessaires à la compréhension du sujet, une revue de littérature permettra de clarifier l'état de connaissance du procédé de tribofinition. Ensuite, la conception des éprouvettes de test sera détaillée, de même que les divers équipements utilisés au cours du projet. Les résultats obtenus seront alors présentés et discutés. Enfin, une brève conclusion résumera les points principaux de ce travail.

2 | Bases théoriques

2.1 Procédé SLM

2.1.1 Généralités

Le procédé SLM, parfois appelé DMLM ou L-PBF, est une technique de fabrication additive qui emploie une source laser pour fondre couche par couche une poudre métallique. Elle permet de fabriquer des pièces *near-net-shape* d'une densité supérieure à 99 % de la densité théorique. Le procédé est notamment utilisé pour la production de pièces en acier par fabrication additive [3].

Les pièces sont fabriquées sur la base d'un modèle CAO converti en fichier STL. Un logiciel est utilisé pour le positionnement des pièces sur un plateau d'impression virtuel. Si nécessaire, des supports sont ajoutés à la pièce, puis le modèle 3D est tranché en couches 2D. Le logiciel calcule les trajectoires laser selon les paramètres d'impression spécifiés et génère un plan de fabrication par empilement des tranches 2D [1] [4].

Certains paramètres du procédé sont contrôlables, tels que la puissance laser, la vitesse de balayage, la hauteur de couche, l'écart vecteur, etc. La densité d'énergie apportée à la pièce, exprimée en J/mm^3 , est une valeur indicative du processus prenant en compte certains de ces paramètres (figure 2.1).

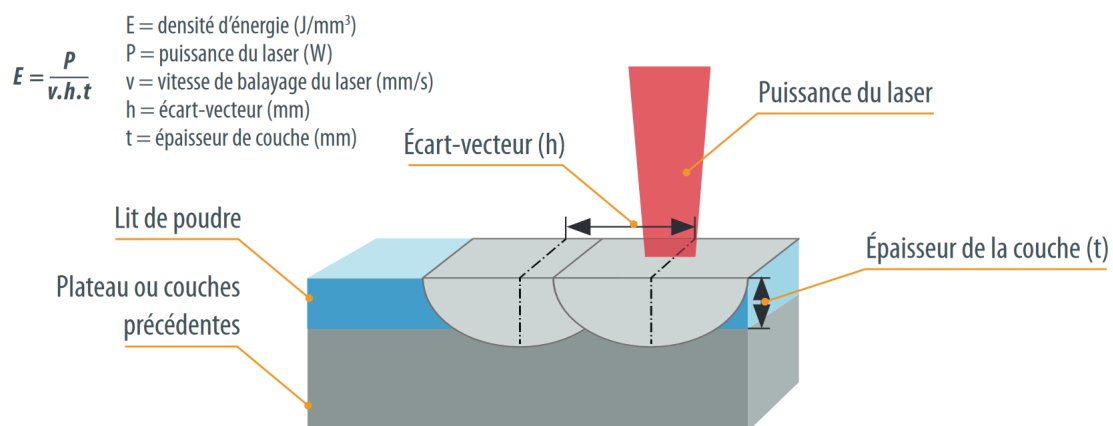


FIGURE 2.1 – Paramètres associés à la densité d'énergie [5]

La maîtrise des paramètres d'impression est un élément essentiel permettant de donner à

la pièce les caractéristiques recherchées [6]. Généralement, ces paramètres diffèrent suivant la zone imprimée : *upskin* (enveloppe haute), *downskin* (enveloppe basse), *border* (contour) ou *volume* (cœur). Ces différents termes sont illustrés dans la figure 2.2.

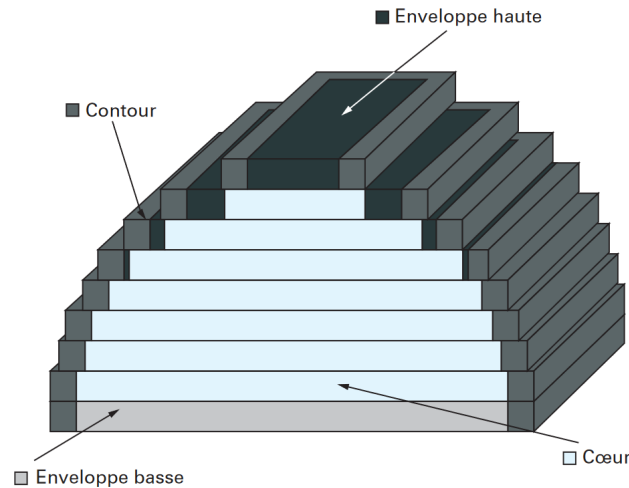


FIGURE 2.2 – Nomenclature des pièces issues de la FA [1]

2.1.2 Fonctionnement de la machine SLM

Un élément mobile à lame appelé *recoater* permet d'étaler une couche de poudre uniforme sur le plateau d'impression. Le lit de poudre est ensuite balayé par un faisceau laser en suivant la trajectoire prédéfinie, causant la fusion sélective des particules de poudre. Une fois la couche consolidée, la plateforme est descendue et le processus répété jusqu'à complétion de la pièce (figure 2.3). La fabrication se fait sous atmosphère contrôlée, en général de l'argon.

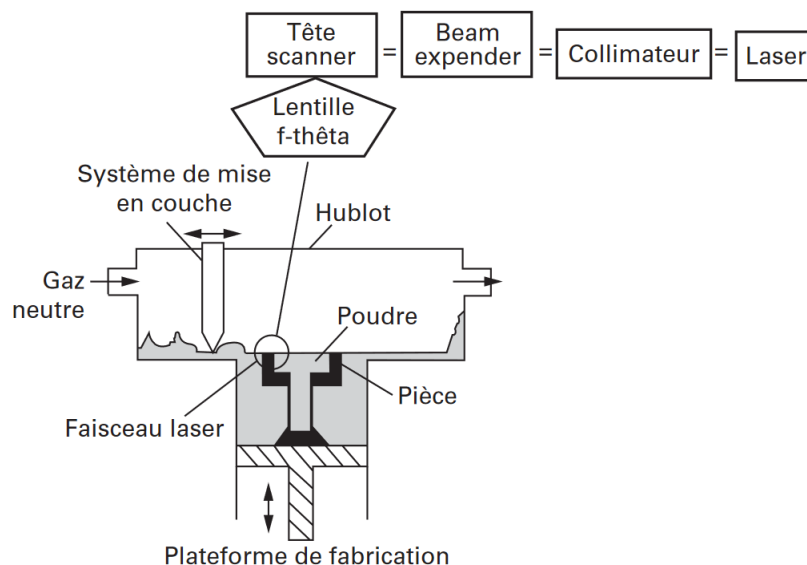


FIGURE 2.3 – Schéma de fonctionnement de la machine SLM [1]

Les pièces sont généralement dotées de supports du même matériau (figure 2.4). Ceux-ci permettent une séparation aisée de la pièce et du plateau en fin de cycle. En outre, ils servent à évacuer la chaleur provenant du laser.

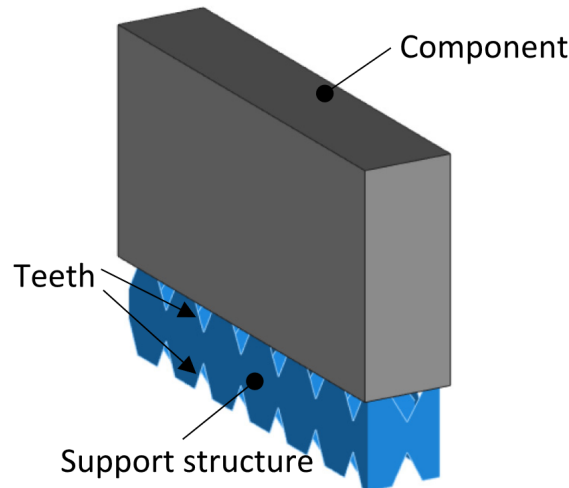


FIGURE 2.4 – Supports de type bloc [7]

Les pièces fortement inclinées souffrent particulièrement de l'augmentation de la température (figure 2.5). En conséquence, les surfaces en porte-à-faux dont l'angle par rapport à l'horizontale est inférieur à un angle limite dépendant du matériau doivent impérativement être supportées [7] [1].

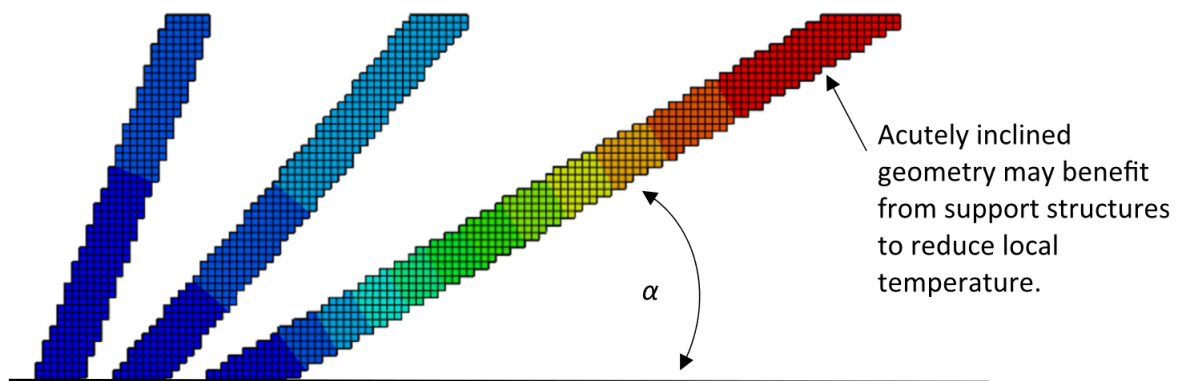


FIGURE 2.5 – Effet de l'angle d'inclinaison des pièces sur la température [7]

En raison de la vitesse de fusion/solidification élevée propre au procédé SLM, les matériaux adaptés sont choisis selon leur coefficient de dilatation thermique [6].

2.1.3 Domaines d'application

Le procédé SLM est utilisé pour les moules d'injection polymère, l'aérospatiale, le sport de compétition, l'armement, le luxe (bijoux) et les prothèses médicales. Il est essentiellement

employé pour la production de pièces géométriquement complexes en petite ou moyenne série, mais parfois aussi pour du prototypage. La fabrication additive est souvent utilisée de pair avec l'optimisation topologique dans le but de réduire la masse des composants [1].

Dans le secteur médical, le procédé sert à la fabrication de prothèses individualisées. Des pièces avec des structures en lattice (treillis), favorisant l'ostéo-intégration, peuvent être fabriquées par SLM [1].

2.1.4 Limites du procédé

L'état de surface des pièces produites par SLM est généralement grossier et irrégulier (figure 2.6). La rugosité des surfaces dépend de nombreux facteurs tels que la puissance et la vitesse du laser, la stratégie de balayage, l'orientation des pièces et leur position sur le plateau, la direction et le débit du gaz inerte, le matériau et les caractéristiques de la poudre [3] [8] [9] [6] [10] [11]. En conséquence, les tolérances dimensionnelles sont difficiles à atteindre [12] [13].

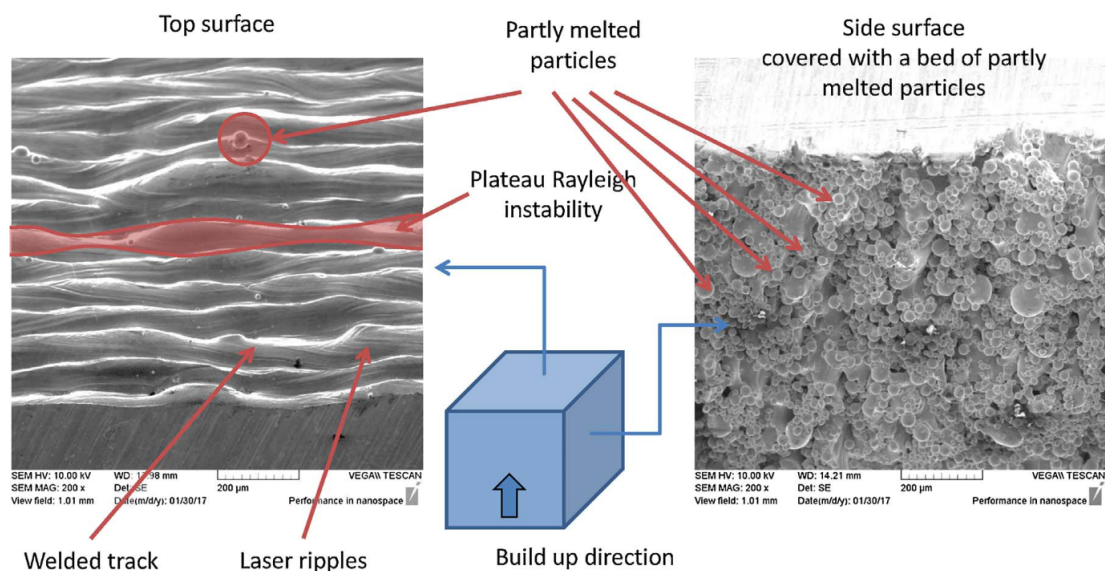


FIGURE 2.6 – Topographie de surface typique d'une pièce fabriquée par procédé SLM [14]

La rugosité élevée des composants SLM est due à la présence de particules de poudre partiellement fondues, le retrait des supports et la conversion des fichiers CAO [10] [13]. Les canaux internes sont particulièrement affectés, à cause de la présence de particules de poudre piégées [10].

Additionnellement, l'empilement de tranches 2D génère une texture indésirable appelée *effet d'escalier* (figure 2.7). L'effet d'escalier est inhérent au procédé SLM et ne peut être éliminé que par post-traitement [4]. Il est la principale cause de la rugosité élevée sur les surfaces inclinées jusqu'à 50° de l'horizontale. Au-delà de cet angle d'inclinaison, les autres facteurs mentionnés ci-haut prédominent [15].

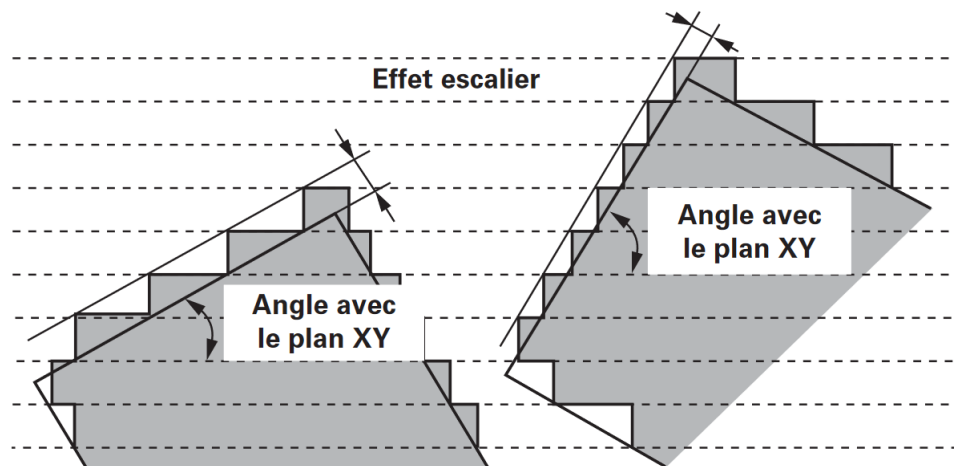


FIGURE 2.7 – Principe de l'effet d'escalier [1]

La rugosité de surface typique des pièces SLM est de R_a 5-35 μm , suivant le matériau et les paramètres machine [10] [4] [14]. Le procédé souffre particulièrement face aux techniques d'usinage conventionnel, capables de produire des pièces présentant une rugosité inférieure à R_a 1.6 μm [16].

A titre de comparaison, les standards de l'aérospatiale requièrent une rugosité inférieure à R_a 3.2 μm pour les pièces forgées et de fonderie [13] [10]. Pour cette industrie en particulier, une rugosité élevée provoque une accumulation de poussières qui peuvent être source de contamination, en plus de gêner le transfert de chaleur entre surfaces en contact [15].

La rugosité élevée des pièces SLM a également un impact négatif sur leur tenue en fatigue, car elle crée un effet d'entaille et des concentrations de contraintes qui sont à l'origine de la formation de fissures [13].

A cause de ces effets, il est souvent nécessaire de post-traiter les composants SLM afin d'améliorer leur état de surface.

2.2 Post-traitement des pièces issues de la FA

Le post-traitement des pièces issues de la fabrication additive est principalement fait par usinage, sablage, grenailage, électro-polissage, polissage chimique ou rectification. Cependant, certains de ces procédés sont limités par la géométrie des pièces. En outre, certaines opérations requièrent de la main d'œuvre qualifiée et sont difficiles à appliquer uniformément sur des géométries complexes [2] [13].

De manière générale, tous les aspects qui rendent la fabrication additive attrayante deviennent problématiques lors du post-traitement : formes complexes rendant difficiles le serrage et l'usinage des pièces, risque de vibrations dû à la faible masse des pièces [12]. Quant aux procédés de sablage, grenailage et microbillage, leur portée est strictement limitée à la ligne de mire de la buse. En conséquence, la complexité des pièces SLM impacte négativement le temps de post-traitement, faisant grimper les coûts [9].

Les procédés de post-traitement usuels peuvent être classés selon la source d'énergie employée : mécanique, chimique et électrochimique, thermique (figure 2.8) [10] [12].

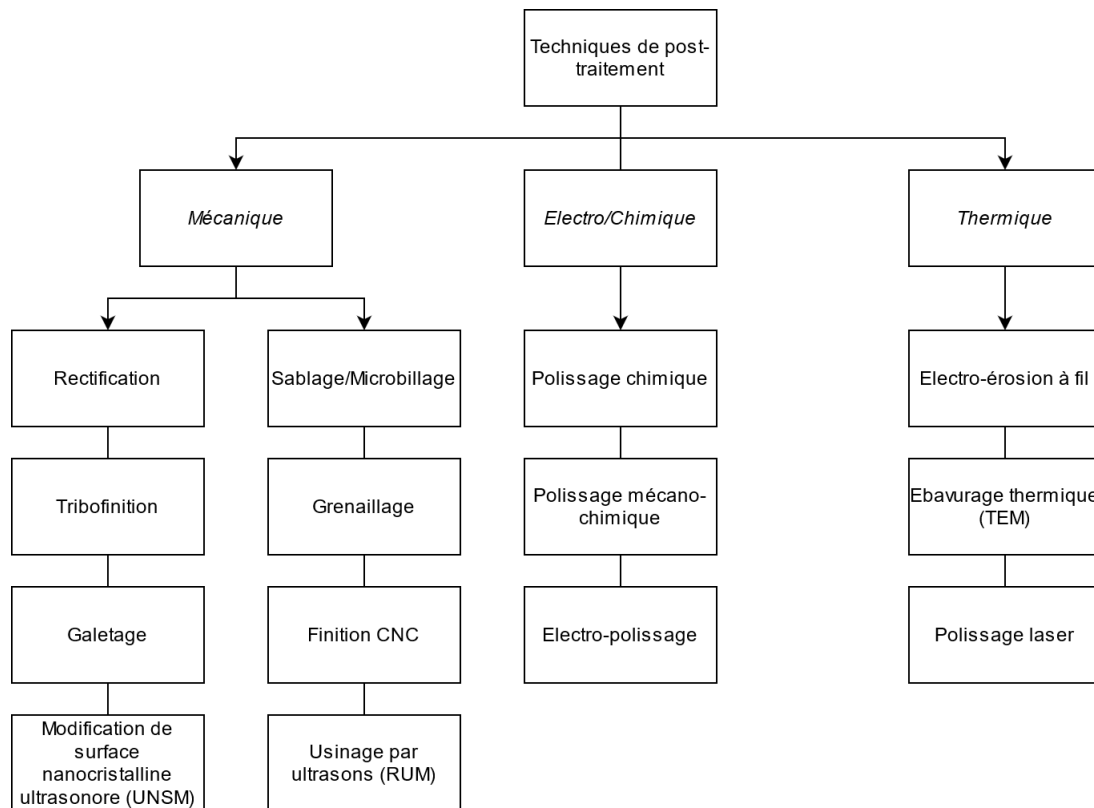


FIGURE 2.8 – Procédés de post-traitement utilisés pour les pièces issues de la FA [10]

2.3 Procédé de tribofinition

2.3.1 Généralités

La tribofinition, ou trovalisation, est un procédé de post-traitement utilisé depuis la fin des années 1950 qui permet de modifier l'état de surface de pièces brutes [17]. En particulier, le processus sert à polir, ébavurer, arrondir les angles, augmenter la dureté en surface, nettoyer les pièces, relâcher les contraintes de surface, améliorer la résistance à l'usure des pièces ou leur apparence (lustre) [18] [19].

Les pièces brutes sont mélangées à des particules libres nommées *médias* dans un conteneur. L'ensemble pièces-médias est appelé la *charge*. Une énergie est transmise à la charge par un mouvement cyclique. La modification des propriétés de la pièce résulte du contact pièces-médias [12] [18].

Le terme tribofinition regroupe plusieurs processus abrasifs distincts, classés selon la cinématique utilisée (figure 2.9) [18] [20] [21] :

- Moteur à excentriques (vibrateur circulaire)
- Tambour rotatif

- Plateau tournant (machine à force centrifuge)
- Carrousel tournant (machine de smuritropie)

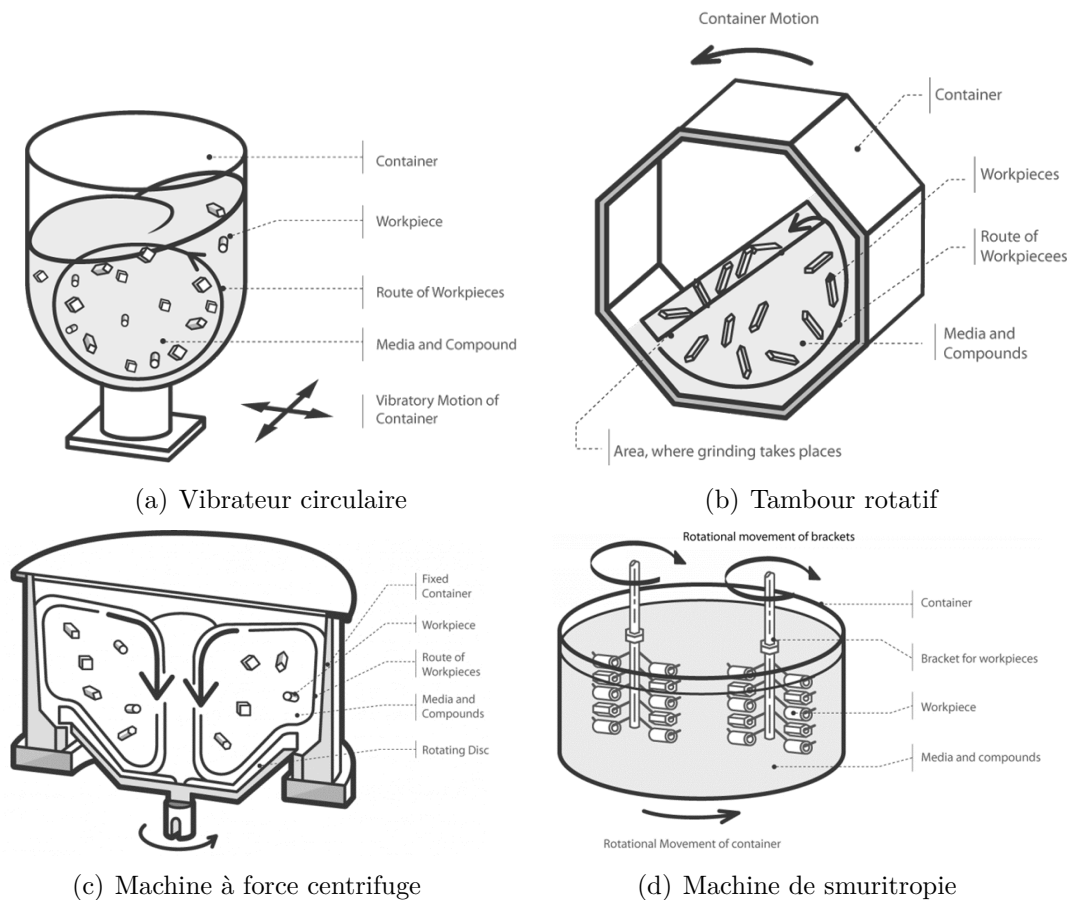


FIGURE 2.9 – Machines de tribofinition

Chaque procédé est adapté à un cas de figure particulier. Par exemple, les machines de smuritropie sont utilisées pour traiter des pièces fragiles ou à valeur élevée. Dans l'industrie, le système vibratoire est le plus utilisé, car simple et rentable [18] [21] [22] [23] [24]. Cependant, le vibrateur étant peu énergétique, les temps de cycles sont parfois très longs [23].

Le procédé associé au vibrateur est nommé *vibrofinition*. Les systèmes vibratoires sont classés selon la forme de la cuve : ronde (vibrateur circulaire), rectangulaire (vibrateur linéaire) ou spirale (vibrateur multi-spires) [9]. En outre, les machines se distinguent par la capacité de la cuve. Les installations de tribofinition peuvent être conçues selon différentes logistiques [25] :

- Traitement en continu : les pièces entrent et sortent de la machine de façon continue (figure 2.10)
- Traitement en batch : les pièces sont ajoutées, traitées puis retirées de la machine par lots

- Traitement séquentiel : les pièces sont traitées en plusieurs étapes consécutives
- Traitement de composants uniques : les pièces volumineuses sont traitées individuellement



FIGURE 2.10 – Machine vibratoire multi-spires pour fonctionnement en continu (Rotomatic R210-27 SE) [26]

Les procédés de tribofinition sont utilisés dans de nombreux secteurs tels que l'automobile, le biomédical, l'aérospatiale, le matériel informatique, l'orfèvrerie, l'alimentaire et la pharmaceutique [26].

2.3.2 Le vibreur circulaire

La machine vibratoire comprend une cuve ouverte dans laquelle est versée la charge. Un revêtement (généralement en uréthane, caoutchouc ou néoprène) est apposé sur la cuve pour minimiser les frottements avec la charge [23] [17]. La cuve est fixée au bâti par l'intermédiaire de ressorts. Elle est reliée au moteur par un arbre sur lequel sont montés deux excentriques (figure 2.11) [18]. Le plus souvent, la machine est directement vissée au sol [27].

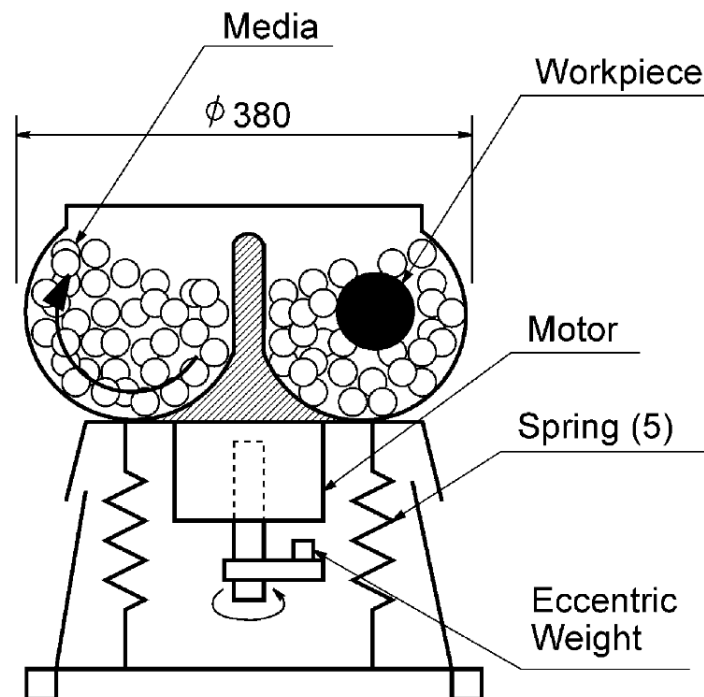


FIGURE 2.11 – Schéma de principe du vibreur circulaire [28]

Avant la mise en marche, une solution à base d'eau est ajoutée à la charge et fait office de lubrifiant. L'action abrasive résulte de la mise en mouvement de la charge par vibration de la cuve [23]. En fin de cycle, la charge est évacuée de la cuve manuellement ou par la trappe de déversement si la machine en est équipée. Ensuite, les pièces sont rincées afin d'éliminer les particules abrasées [15] [22]. La séparation pièces-médias se fait par tamisage ou, si les pièces sont magnétiques, avec un aimant [22]. Dans le cas où les pièces et les médias sont de tailles similaires, le tri doit être fait manuellement. Afin d'éliminer correctement le résidu, le rinçage doit être fait avant séchage des pièces. Dans le cas contraire, le résidu risque de se loger et sécher dans les creux de la pièce [17].

2.3.3 Attractions du procédé

La tribofinition est un procédé attractif car elle permet de traiter un grand volume de pièces avec des coûts d'investissement réduits. De plus, le processus présente une bonne répétabilité et peut être automatisé, réduisant le besoin en main d'œuvre [18] [12] [20] [29].

En comparaison des autres systèmes de tribofinition, les machines vibratoires requièrent peu de maintenance, grâce au faible nombre de pièces en mouvement. Les principales opérations de maintenance sont le remplacement des roulements et le rebobinage du moteur [17].

La tribofinition permet de traiter des géométries complexes comme celles que les procédés de fabrication additive peuvent produire [20]. Le procédé permet en outre de traiter tous types de métaux, plastiques, céramiques, élastomères, pierres naturelles ou bois [26].

Les chocs entre les pièces et les médias provoquent un effet de grenailage, et des contraintes de compression ainsi qu'une dureté élevée sont observées à la surface des pièces post-traitées [18] [20] [21]. Ces contraintes résiduelles permettent d'améliorer la ténacité des pièces en refermant les amorces de fissures. Le procédé va donc à l'encontre des techniques conventionnelles d'usinage et de rectification, qui tendent à développer des contraintes de traction à la surface des pièces [18].

En outre, l'arrondissement des angles et l'ébavurage qui résultent du procédé (figure 2.12) permettent de réduire les concentrations de contraintes dans des composants critiques tels que les aubes de soufflante. En réduisant les concentrations de contraintes, la ténacité et la résistance à la fatigue des pièces sont améliorées [18]. Enfin, l'arrondissement des angles permet d'améliorer l'adhésion des peintures et revêtements aux arêtes des pièces. Lors de l'assemblage, le risque d'endommagement des composants par des arêtes vives est également diminué [18].

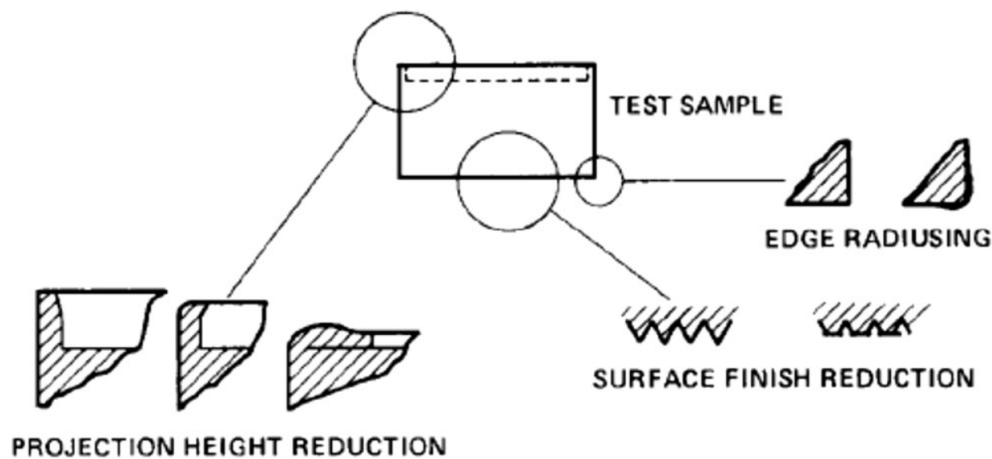


FIGURE 2.12 – Illustration de certains effets observés sur les pièces traitées par tribofinition [18]

2.3.4 Médias

Généralités

Les médias représentent l'outil qui donne aux pièces la topographie de surface requise [18] [20] [23] [30]. Ils peuvent être abrasifs ou non. Ils existent en plusieurs géométries, les formes usuelles étant des pyramides, cônes, cylindres et sphères (figure 2.13). La taille des médias est en général inférieure à 25 mm de côté [23] [31].



FIGURE 2.13 – Différents médias céramiques [32]

Les médias sont désignés par un code se référant à leur géométrie, par exemple SCT (*Straight-Cut Triangle*) ou ACC (*Angle-Cut Cylinder*). Ils sont parfois classés selon leur action abrasive : *rough-cut*, *medium-cut* ou *finish-cut* [23] [9].

Composition

Les médias abrasifs sont constitués de particules d'alumine préformées avec un liant [27]. L'agressivité des médias peut être altérée en modifiant la proportion d'abrasif et de liant ou la taille des grains abrasifs [17] [27]. Ces paramètres contrôlent également la masse et le taux d'usure des médias [9].

Ce type de médias est employé lorsqu'un enlèvement de matière est requis, en particulier pour des opérations d'ébavurage [31] [33]. Ils fonctionnent de manière analogue aux papiers de verre : le taux d'enlèvement de matière est proportionnel à la taille de grain (i.e. des particules abrasives). En revanche, un grain plus grossier laissera des traces plus profondes à la surface des pièces et résultera en une surface moins lisse [31] [34] [27]. Le taux d'enlèvement de matière est également proportionnel à la différence de densité entre les médias et les pièces [23].

Enfin, il est à noter que la rugosité des médias abrasifs diminue avec le temps d'utilisation ; par conséquent, leur performance de finition n'est pas constante. Wang et al. (2000) observent que la rugosité des médias se stabilise après 20 h de fonctionnement [19].

Usure

A mesure qu'un média abrasif est utilisé, l'agent liant se détériore afin d'exposer de nouvelles particules abrasives. Ce faisant, il laisse un résidu blanc qui se dépose sur les pièces [34] [17].

De manière générale, l'usure des médias est proportionnelle à leur pouvoir abrasif. Plus le média travaille, plus son usure sera marquée. A l'inverse, lorsque les médias travaillent peu, ils ont tendance à écrouir les surfaces plutôt qu'à les abraser [22] [34]. Ainsi, les médias non-abrasifs s'usent très lentement et déposent peu de résidu [17] [27].

Chaque type de média est conçu pour un équipement de tribofinition précis. Ainsi, un média pour tambour rotatif, un procédé à faible énergie, s'usera trop rapidement dans une machine centrifuge, un procédé à haute énergie [34].

L'usure des médias provoque une baisse du niveau des médias dans la cuve du vibreur [33]. Comme le volume de médias diminue sans que celui des pièces ne varie, des problèmes de contacts entre pièces peuvent apparaître. Il est donc nécessaire de vérifier le niveau des médias dans la cuve à intervalles réguliers [17].

De plus, avec la diminution de taille des médias peuvent apparaître des problèmes de logement des médias dans les perçages et autres cavités [27] [17]. Enfin, l'énergie transmise par le média à la pièce lors des impacts diminue avec sa taille [17].

2.3.5 Lubrification

Une solution à base d'eau est ajoutée à la charge afin d'améliorer l'effet des médias sur les composants à traiter. La solution lubrifiante est un mélange de produits chimiques qui se dissolvent dans l'eau et forment une solution dont le but est de lubrifier l'interface pièces-médias, évacuer les particules abrasées et la chaleur générée par les frottements, nettoyer les surfaces des pièces et contrôler le pH du procédé [18] [26] [17] [31].

Certains additifs (accélérateurs) réagissent chimiquement avec les pièces dans le but d'accélérer l'enlèvement de matière [30]. L'accélérateur est choisi en fonction du matériau des pièces à traiter.

Le cycle peut s'effectuer en circuit ouvert (c'est-à-dire avec une circulation continue d'eau et d'additif) ou en circuit fermé. Le traitement en circuit fermé peut s'effectuer en *batch* ou avec filtrage et recirculation de l'eau [22] [17]. Ne permettant pas d'évacuer les particules abrasées de la cuve, le traitement en batch résulte en un temps de rinçage élevé en fin de traitement [22]. En circuit ouvert, le débit d'eau typique est de 0.1 à 0.3l/h par litre de capacité de la cuve [17] [23]. Dans l'industrie, les cycles se font généralement en circuit ouvert [30].

2.4 Plans d'expériences

2.4.1 Généralités

La méthode des plans d'expériences (Design of Experiments ou DOE) est une approche expérimentale qui sert à déterminer la relation qui lie les facteurs et la réponse d'un procédé (figure 2.14). Le terme *plan d'expériences* se réfère à la matrice expérimentale selon laquelle les essais seront effectués.

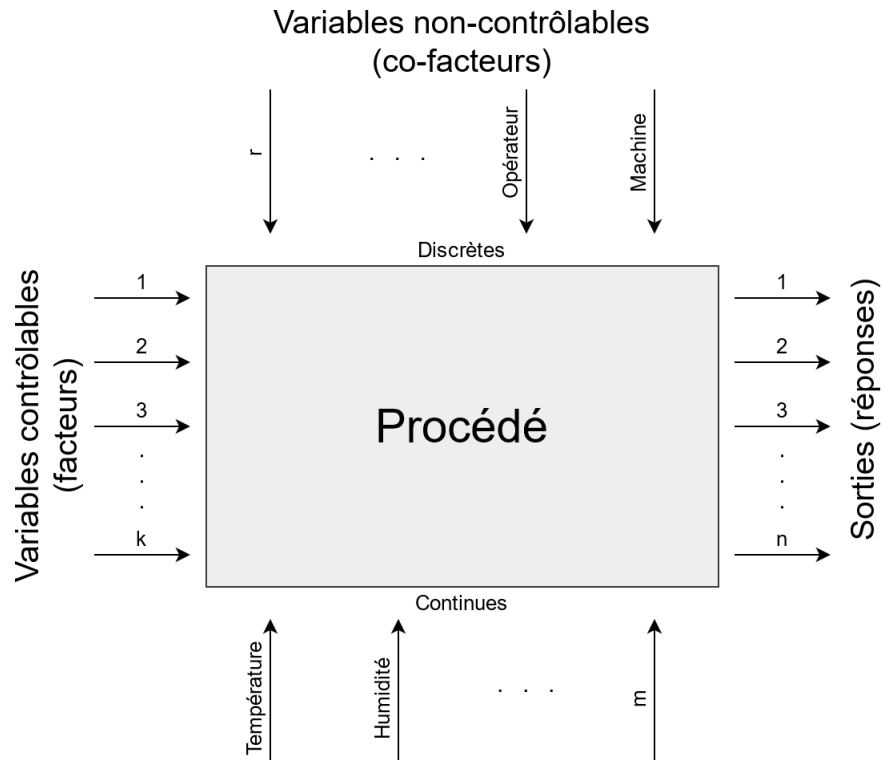


FIGURE 2.14 – Représentation d'un procédé sous forme de boîte noire [35]

Alors que les méthodes classiques (OFAT ou OVAT) ne font varier qu'un facteur à la fois, la méthode DOE fait varier plusieurs facteurs simultanément [36]. Cela permet d'obtenir des informations sur les interactions entre facteurs (figure 2.15).

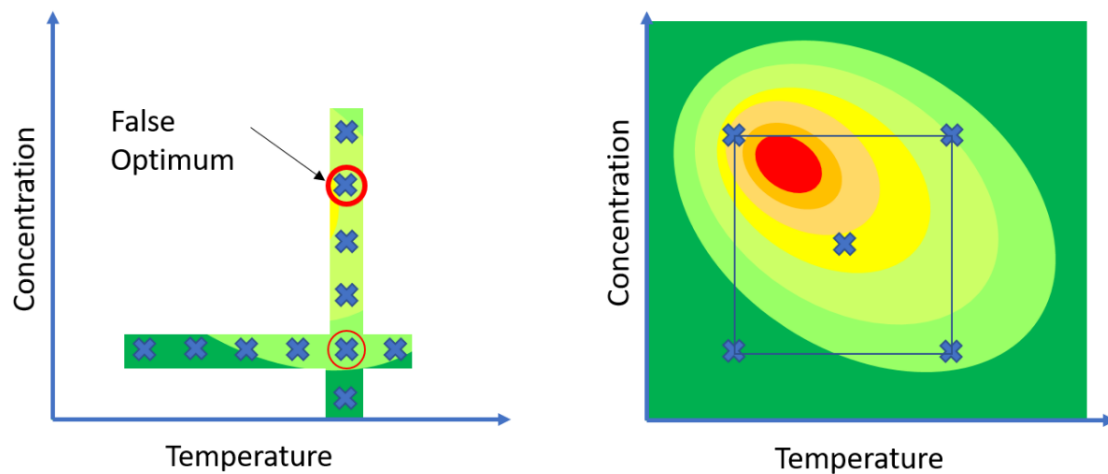


FIGURE 2.15 – Approche OVAT (gauche) et DOE (droite) [37]

Plusieurs objectifs peuvent être atteints avec une approche de type DOE :

- Comparer plusieurs facteurs

- Classer les facteurs selon leur importance
- Modéliser un procédé
- Optimiser un procédé

2.4.2 Types de plans

Un plan se compose d'une suite ordonnée d'essais. Plusieurs types de plans existent ; le plus simple consiste à effectuer toutes les combinaisons possibles de facteurs et de niveaux (plan factoriel complet). Un tel plan permet d'étudier toutes les interactions entre facteurs, mais le nombre d'essais augmente exponentiellement avec le nombre de variables et de niveaux.

Suivant l'objectif de l'étude, certaines informations peuvent être considérées comme superflues. L'utilisation d'un plan non-exhaustif (factoriel fractionnaire, composite centré, Box-Behnken, etc.) permet alors de réduire significativement le nombre d'essais.

3 | Revue de littérature sur le procédé de vibrofinishion

3.1 Mouvement de la charge

La mise en vibration de la cuve provoque une fluidification de la charge [19] [33]. L'énergie vibratoire est transmise à la charge par l'intermédiaire des parois de la cuve [38]. La charge effectue un mouvement de roulis dans lequel elle monte sur les parois de la cuve avant de retomber vers le moyeu central. Simultanément à ces tonneaux, la masse fluidifiée avance tangentiellement dans la rigole de la cuve dans le sens opposé à la rotation de l'arbre moteur (figure 3.1) [18] [23] [39]. Le mouvement résultant trace un toroïde hélicoïdal [18] [23] [21]. S'il est observé que les médias se déplacent vers les parois de la cuve plutôt que vers le moyeu, le sens de rotation du moteur doit être inversé.

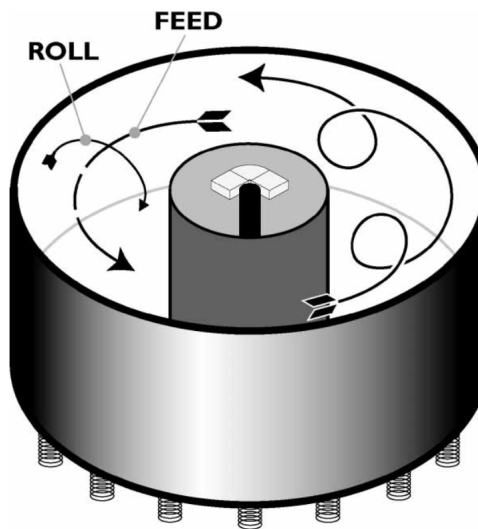


FIGURE 3.1 – Schéma du mouvement de la charge [23]

Par convention, la masselotte inférieure mène la masselotte supérieure dans le sens de rotation du moteur [18] [27]. La vitesse d'avance de la charge peut être accélérée en augmentant la masse de l'excentrique supérieur par ajout de disques. Similairement, la vitesse de roulis peut être accélérée en augmentant la masse de l'excentrique inférieur [34] [18] [17].

L'angle entre les deux excentriques peut être modifié. En refermant cet angle, les masselottes sont rassemblées du même côté de l'arbre moteur, accentuant le déséquilibre et résultant en une vitesse de roulis plus élevée [17]. Habituellement, les vibrateurs circulaires opèrent avec un angle de 75 à 110° [27]. Avec un angle de 180° , l'arbre moteur sera parfaitement équilibré et ne transmettra aucune énergie à la cuve. A l'inverse, un angle de 0° résultera en une vitesse de roulis maximale [27].

En combinant ces différents paramètres, il est possible de modifier le chemin tracé par la charge en mouvement. Par exemple, en ouvrant l'angle entre les excentriques, la vitesse de roulis diminue et la charge effectue moins de tonneaux pour chaque tour de rigole (figure 3.2) [17].

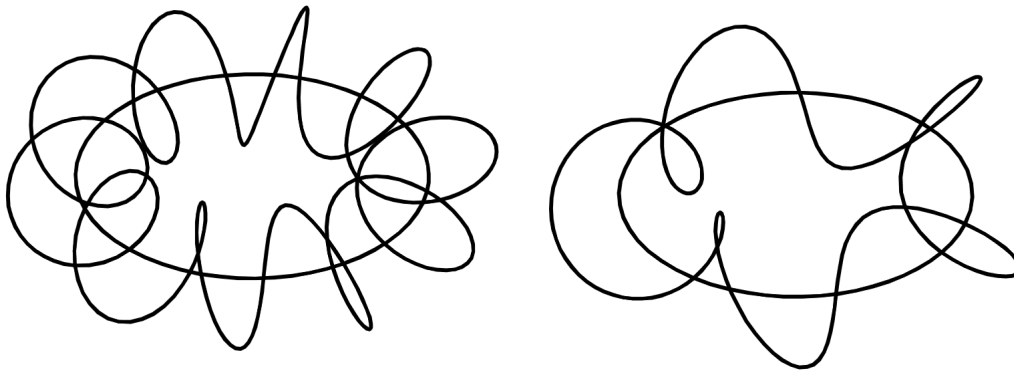


FIGURE 3.2 – Courbe tracée par la charge en mouvement avec, pour chaque tour de rigole, 10 tonneaux (gauche) et 5 tonneaux (droite) [27]

Un tracé comportant plus de tonneaux allongera la distance parcourue par les pièces à chaque tour ; en conséquence, le nombre de contacts pièces-médias augmente et le temps de cycle est raccourci [27]. En revanche, un tel tracé augmentera la proximité entre les composants lorsque ceux-ci se trouvent proches du moyeu, accroissant le risque de collision [39]. En raison de ce problème, les pièces de nature plus délicate (aluminium, laiton, zinc) sont plus adaptées à un tracé comportant moins de tonneaux [17].

Pour optimiser le temps de cycle, les masselottes doivent être réglées de sorte à obtenir la vitesse de roulis la plus élevée sans qu'il n'y ait de collisions entre les pièces. Dans la pratique, le nombre de tonneaux est augmenté en réduisant le nombre de disques sur l'excentrique supérieur et inversement [27].

3.2 Action abrasive

A la mise en vibration de la machine, la masse fluidifiée entraîne les pièces dans son mouvement. La différence relative de masse entre pièces et médias fait que les pièces ont une vitesse plus faible [18] [19] [23]. Le glissement relatif pièces-médias provoque une usure adhésive des pièces ; en plus de ce mécanisme, les impacts de médias sur les surfaces des pièces engendrent une élimination des pics de rugosité par déformation plastique [12] [18] [30] [38]. Ces deux mécanismes résultent en une modification de l'état de surface des

pièces [12] [20]. Sur les pièces issues d'usinage conventionnel, les stries sont éliminées et remplacées par une texture uniforme et isotrope [38] [31].

Les vallées ne sont pas affectées par l'usure adhésive, car la taille des médias ne leur permet pas d'atteindre ces zones (figure 3.3) [12] [9] [40]. En revanche, lorsque la surface est déformée plastiquement, le matériau plastifié peut se déplacer dans les creux ; on observe donc une diminution de la profondeur des vallées [40].

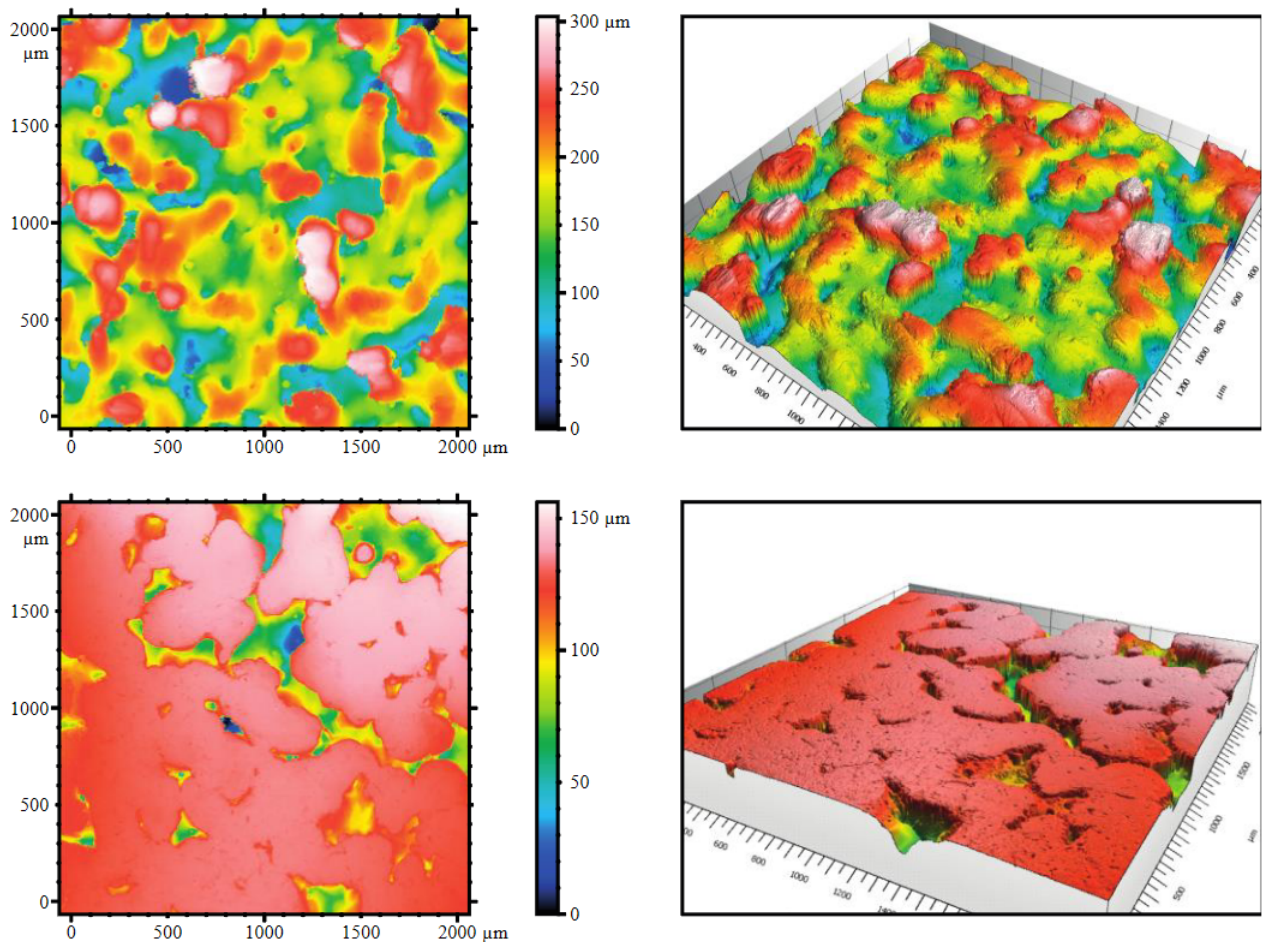


FIGURE 3.3 – Surface brute d'une pièce en AlSi10Mg fabriquée par SLM (haut) et surface obtenue après 40h de post-traitement dans un vibreur circulaire (bas) [12]

En utilisant un capteur de force et une caméra, Yabuki et al. (2002) ont identifié trois modes de contact d'une pièce avec des médias sphériques dans un vibreur circulaire (figure 3.4) [28] :

- (a) Impact libre
- (b) Roulement d'un média sur la surface de la pièce
- (c) Roulement d'un média sur un média immobile

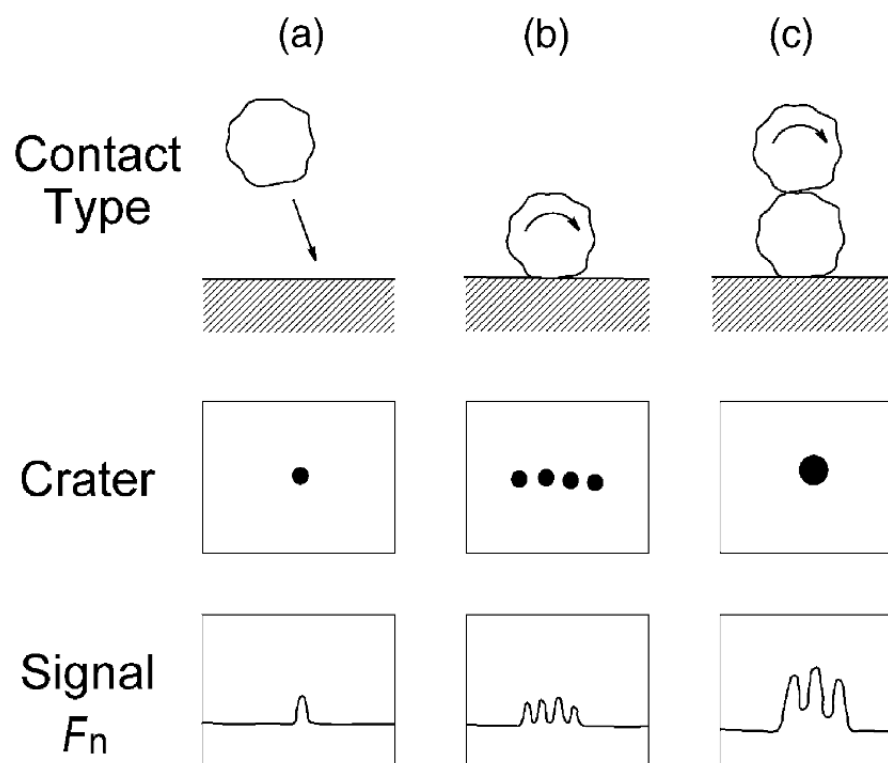


FIGURE 3.4 – Modes de contact pièces-médias [28]

Consécutivement à ces impacts, trois mécanismes distincts peuvent se produire à la surface des pièces (figure 3.5) [21] :

- (a) Déformation plastique pure
- (b) Labourage sans copeau
- (c) Labourage avec copeau

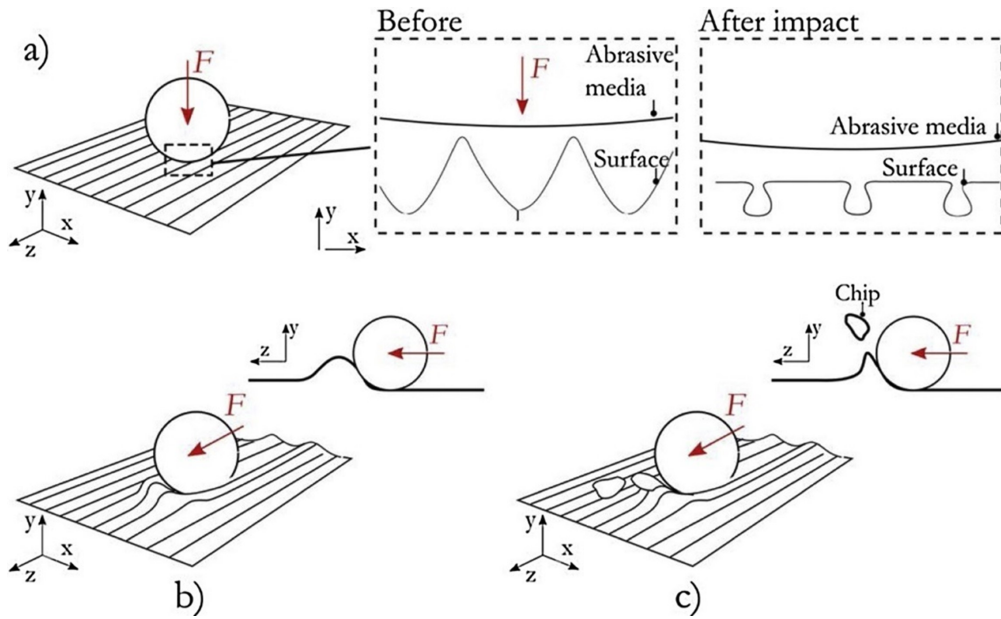
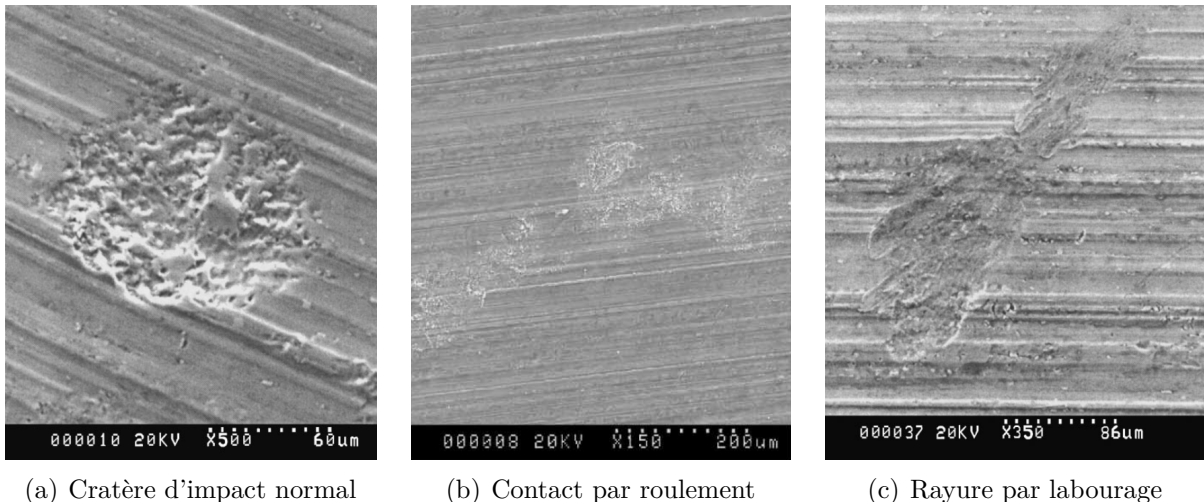


FIGURE 3.5 – Mécanismes d'abrasion [21]

Lors des impacts normaux (i.e. perpendiculaires à la surface), la surface subit un effet de grenailage (sans enlèvement de matière) [23]. Cependant, un impact normal est généralement suivi d'un glissement du média sur le côté de la zone d'impact. Ce glissement peut suffire à enlever de la matière par labourage (figure 3.6) [21]. L'enlèvement de matière est de l'ordre de quelques microgrammes par pièce pour les procédés de polissage et brillantage, et quelques grammes pour l'ébavurage [23].



(a) Cratère d'impact normal

(b) Contact par roulement

(c) Rayure par labourage

FIGURE 3.6 – Observations au MEB de différents types de contacts [19] [28]

3.3 Paramètres du procédé

3.3.1 Variables clés

Etant donné la complexité du mécanisme d'abrasion, l'état de connaissance du procédé repose en grande partie sur l'expertise des fournisseurs. En conséquence, les paramètres du système sont souvent déterminés par expérimentation [18] [23] [31].

Les paramètres essentiels du procédé de vibrofinition ont été identifiés par Mediratta et al. (2016) (figure 3.7).

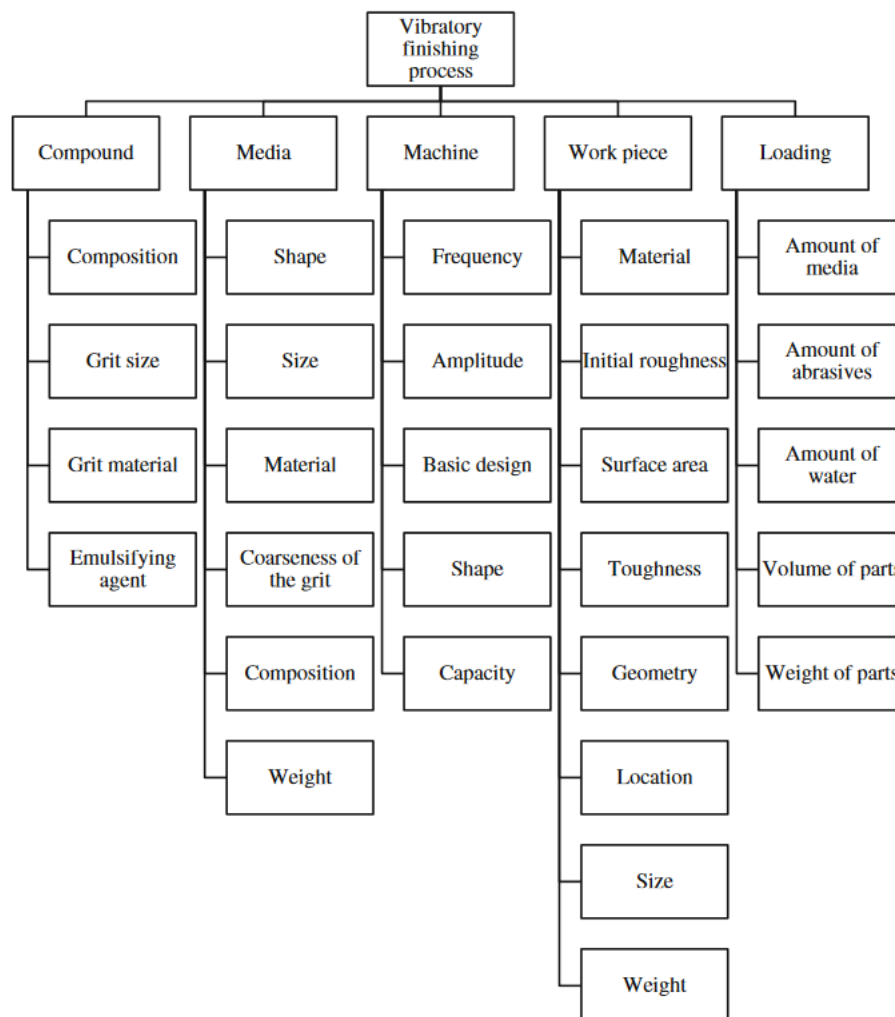








FIGURE 3.7 – Paramètres du procédé de vibrofinition [18]

3.3.2 Forme et taille des médias

La figure 3.8, issue d'un catalogue ABC SwissTech, présente à titre indicatif quelques formes et tailles usuelles de médias céramiques. Notons que l'entreprise propose au total plus de 6500 médias abrasifs différents.

Ce tableau n'indique que les médias les plus fréquents ; pour d'autres dimensions, merci de nous consulter.

		SCT		ACT		SCC		ACC		BALL		TRISTAR
Nuance	Descriptif											
FPR	Porcelaine très dure					1*2 1.3*2.7 1.7*5	2*8 3*10 4*14					
FP	Porcelaine dure	2*2 3*3 4*4 5*5 6*6 10*10	2*2 3*3 4*4 5*8 6*10 8*12	2*3 2*4 3*3 5*5 5*8 6*10	8*12 10*15 12*12 15*15 20*20 6*10	2*(4-6) 3*5 3*7 3*10 4*(6-10)	5*8 5*15 6*15 8*12 10*13	0.3 0.5 1 2 - 5 10 - 12 15			2*2 3*3 4*4 5*5 6*6 8*8	
P	Porcelaine dure-soft	2*2 3*3 4*4 5*5 6*6 7*7	10*10 12*14 13*26 15*15 20*20 30*30	2*2 3*3 4*4 5*5 6*6 7*7	10*10 12*8 13*26 15*15 20*20 30*30	3*10 6*13 10*10 12*14 13*26	3*6 4*(6-14) 6*(15-20) 7*15 8*12	1 2 4 5	10 12 16 20 25		3*3 4*4 6*6 10*10 15*18 18*18	
FGA	Céramique fine	2*2 3*3 4*4 5*5 6*6 7*7	10*10 12*14 13*26 15*15 20*20 30*30	2*4 3*5 4*5 5*5 6*10 7*15	10*10 12*8 13*26 15*15 20*20 25*25	2*4 3*5 4*10 5*12 6*15 7*15	10*15 12*25 15*20 15*30 20*30 30*30	2*4 3*5 4*10 5*12 6*15 7*15	10*15 12*25 15*20 15*30 20*30 30*30	1 2 3 4 5 6-9 30	10 12 16 22 25 30	3*3 4*4 6*6 8*8 8*20 10*12
MGA	Céramique mordante	2*2 3*3 4*4 5*5 6*6 7*7	10*10 12*14 13*26 15*15 20*20 30*30	2*2 4*5 4*10 5*5 6*6 6*10 6*15 8*15	10*10 10*15 12*14 12*25 15*15 20*20 30*30 50*50	2*4 3*5 4*10 5*12 6*15 7*15	10*15 12*25 15*20 15*30 20*30 30*30	2*4 3*5 4*10 5*12 6*15 7*15	10*15 12*25 15*20 15*30 20*30 30*30	1 2 3 4 5 6-9 30	10 12 16 22 25 30	4*4 6*6 7*15 8*8 8*20 10*10 30*12

Egalement disponibles : tristar coupe biaisée, cône, pyramide, ellipse, star, losange, wedge...

FIGURE 3.8 – Catalogue de médias céramiques ABC SwissTech [22]

La forme des médias doit être telle que toutes les surfaces à travailler peuvent être atteintes. Un mélange de médias de différentes formes peut être préférable [9].

Les médias avec des arêtes vives sont plus aptes à éliminer les aspérités pointues, et donc à réduire la rugosité [21] [41]. Si de tels médias permettent de réduire le temps de cycle, en particulier pour les surfaces très rugueuses, l'état de surface final des pièces est plus grossier [30].

Dans le cas de médias sphériques, c'est la vitesse relative pièces-médias qui détermine le taux d'enlèvement de matière [31].

Pour les autres formes de médias, l'enlèvement de matière et la déformation plastique sont proportionnels à la force d'impact, et donc à la taille des médias [18] [21] [31]. Les médias plus gros ont alors une vitesse de coupe plus élevée, et le temps de cycle s'en trouve réduit [9] [22]. Cependant, il est à noter qu'un taux d'enlèvement de matière élevé résulte en une surface grossière.

En étudiant l'influence de la taille des médias sur des éprouvettes issues d'usinage conventionnel (tournage et rectification), Malkorra et al. (2020) observent l'effet inverse : en fin de cycle, l'enlèvement de matière (en volume) est plus important avec des petits médias [21]. Ils expliquent ce phénomène ainsi : une fois que la surface n'a plus de pics, les

grands médias n'ont plus la capacité d'abraser la surface, au contraire des petits médias. Par conséquent, ces derniers continuent d'enlever de la matière, alors que les grands médias ne peuvent plus que déformer plastiquement la surface [21].

Grâce aux procédés à haute énergie comme la centrifugation, il est néanmoins possible d'obtenir un bon état de surface avec de petits médias sans pour autant augmenter le temps de cycle [9].

Enfin, pour accélérer l'enlèvement de matière, il est nécessaire de maximiser la surface de contact pièce-médias. Il existe trois surfaces de contact possibles : contact plan, linéaire ou ponctuel [17].

Un contact plan se produit lorsqu'une partie plane d'une pièce est touchée par la face plane d'un média. Ce type de contact offre le temps de cycle le plus court pour les opérations abrasives [17].

Un contact linéaire est le résultat d'une collision entre une surface plane et une surface incurvée. Un tel contact génère essentiellement de la déformation plastique et peu d'enlèvement de matière [17].

Un contact ponctuel se produit lorsqu'un média sphérique contacte une surface plane ou vice-versa. Dans un contact ponctuel, l'intégralité du poids du média est concentrée en un point singulier. Ainsi, les médias sphériques sont typiquement destinés à des opérations de grenailage [17].

3.3.3 Taux de remplissage de la cuve

Les fabricants de machines vibratoires commercialisent leurs produits selon la capacité théorique de la cuve. Dans la pratique, ce volume théorique ne peut jamais être atteint, sans quoi la charge déborderait au démarrage de la machine. Le volume de travail effectif du vibreur représente environ 80 % du volume théorique tel qu'indiqué par le fournisseur (figure 3.9) [39].

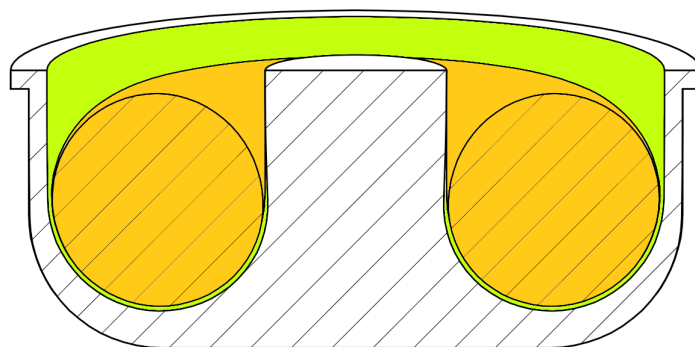


FIGURE 3.9 – Vue en coupe d'un vibreur circulaire montrant le volume théorique (en vert) et le volume de travail effectif (en orange) [39]

En conséquence, le taux de remplissage de la cuve (pièces + médias) est généralement de 60 à 80 % du volume théorique [22]. Un taux de remplissage faible correspond à un processus énergique, et donc à un enlèvement de matière important, au risque de générer

des chocs entre pièces. Au contraire, un taux de remplissage élevé produira plutôt un polissage et brillantage des pièces [22] [17].

Le ratio pièces-médias usuel est de 1 : 4, mais peut aller de 1 : 20 à 1 : 1 [26] [23] [17]. Cependant, un travail de tri important résulte du traitement de petits lots de pièces [22].

3.3.4 Solution lubrifiante

Eau

Le simple ajout d'eau suffit à améliorer l'état de surface des pièces finies, le liquide formant un film lubrifiant empêchant l'adhésion entre pièces et médias [21]. Un cycle « sec » (sans eau ni additif) produira uniquement un effet de grenailage, alors que l'utilisation d'eau permettra d'obtenir un polissage des pièces [30].

L'amélioration de la capacité lubrifiante permet aux médias de glisser plus facilement sur les surfaces des pièces. En conséquence, une quantité d'eau plus importante permet d'obtenir des surfaces plus lisses en fin de cycle [30] [42].

Toutefois, une lubrification excessive provoque un effet d'amortissement entre les pièces et les médias. En conséquence, la vitesse d'impact des médias est réduite et le temps de cycle augmente [18] [30] [31] [34].

A l'inverse, si la quantité d'eau est trop faible, des particules abrasées peuvent se loger dans les cavités des surfaces brutes. Lorsque des médias impactent les zones à proximité de ces incrustations de particules, la déformation plastique résultante piège les débris sous la surface [30] [21]. Ce phénomène est réduit lors de cycles en circuit ouvert, car la circulation de l'eau permet d'évacuer les particules abrasées de la cuve [30].

Additifs

L'additif de base est un agent de surface, qui a pour but de nettoyer les pièces et suspendre les particules abrasées dans la solution [31]. L'additif produit une mousse qui assure le mouillage permanent des pièces traitées. Sans cette mousse, le nettoyage des pièces est peu efficace et le temps de cycle est fortement rallongé [34].

Pour empêcher la corrosion des pièces, un inhibiteur de corrosion peut être utilisé. Par exemple, une solution fortement alcaline permet de dérouiller certains aciers. Les solutions fortement acides attaquent les oxydes métalliques [34].

Pour certains matériaux sensibles, un additif doit être utilisé afin de contrôler le pH du procédé. Lorsque des pièces en zinc sont traitées avec un pH trop faible, le métal peut être dissous. A l'inverse, si le pH de la solution est trop élevé, le métal se trouve noirci [17].

Enfin, les additifs de type accélérateurs chimiques fonctionnent de manière analogue aux traitements de surface par conversion. Le composé réagit avec les pièces et forme une couche ductile d'environ 1 μm [27]. La surface convertie est ensuite abrasée par les médias et expose le métal nu, qui est à nouveau converti par réaction chimique avec l'accélérateur [27].

3.3.5 Fréquence de vibration

La fréquence de vibration (Hz) ou vitesse moteur (tr/min) peut être altérée à l'aide d'un variateur de fréquence [31]. La valeur usuelle est de 30 Hz (1800 tr/min), mais peut aller de 20 à 60 Hz (1200-3600 tr/min) [17] [18].

De manière générale, plus celle-ci est élevée, plus le processus est énergique : le temps de traitement diminue avec l'augmentation de la fréquence. L'efficacité plus élevée résulte d'une meilleure circulation des médias et d'une augmentation de leur vitesse (et donc de leur force d'impact) [18] [21] [43].

Si une fréquence plus élevée permet d'accélérer l'enlèvement de matière, l'état de surface après post-traitement peut être dégradé [43] [34]. En outre, le taux d'usure des médias est accéléré [34].

Enfin, il reste à noter qu'une force d'impact pièces-médias excessive résultant d'une vitesse trop élevée peut causer des fissures et des fragmentations [18].

3.3.6 Amplitude des vibrations

L'amplitude de la cuve est une mesure de la compression et de l'expansion des ressorts [17]. Elle est de l'ordre de 2 à 10 mm dans les trois directions [26] [18] [19] [31].

Les amplitudes très élevées sont réservées aux pièces lourdes, qui nécessitent une énergie conséquente pour être soulevées par les médias [27] [17]. Les métaux doux comme l'aluminium et le zinc sont traités dans une plage de 2.5 à 3.5 mm, et les aciers au carbone de 3.5 à 5 mm. Enfin, les métaux malléables comme le laiton risquent d'être endommagés par des amplitudes supérieures à 2.5 mm.

L'amplitude peut être modulée en agissant sur l'excentrique inférieur. L'ajout de poids sur celui-ci accroît le déséquilibre entre les deux masselottes aux extrémités de l'arbre moteur et augmente l'amplitude des vibrations [17] [34] [27].

Alternativement, l'angle entre les excentriques peut être modifié pour changer l'amplitude des vibrations [26] [18]. Plus cet angle est faible, plus l'amplitude sera élevée. L'amplitude maximale correspond à un angle de 0° , alors qu'un angle de 180° ne produira presque pas de vibrations [26].

Enfin, l'augmentation de la vitesse de rotation du moteur conduit également à une augmentation de l'amplitude [26].

3.3.7 Accélération de la cuve

L'accélération de la cuve est fonction de la fréquence (ou vitesse de rotation) et de l'amplitude [26]. Elle est fortement influencée par la position de l'excentrique inférieur. Le taux d'enlèvement de matière augmente proportionnellement à l'accélération de la cuve [18] [23] [31]. A l'inverse, la masse de la charge a une influence négative sur l'accélération : une charge lourde diminuera l'accélération de la cuve et vice-versa [23].

Il est à noter que l'augmentation de l'accélération n'a pas d'influence positive sur la rugosité des surfaces en fin de cycle [23]. En outre, une accélération trop élevée risquerait

d'endommager la machine ; en règle générale, celle-ci ne devrait pas dépasser 6 g [26].

3.4 Modélisation analytique du procédé

Domblesky et al. (2003) assimilent le vibreur circulaire à un oscillateur harmonique dont les paramètres sont l'accélération de la cuve, l'amplitude de vibration, la constante des ressorts et la masse de l'ensemble cuve-charge [23].

En 1996, Hashimoto a étudié le procédé de vibrofinition sur des échantillons cylindriques issus d'usinage conventionnel. Il a établi trois règles de bases régissant le mécanisme d'abrasion [29] :

- La rugosité des pièces diminue exponentiellement jusqu'à une valeur constante nommée *limite de rugosité* qui dépend de la texture de surface inhérente à la pièce.
- Plus la différence entre la rugosité brute et la limite de rugosité est grande, plus la rugosité va évoluer rapidement.
- En régime stationnaire, le procédé vibratoire a un taux d'enlèvement de matière constant.

Les résultats de Uhlmann et al. (2014) appuient la théorie de Hashimoto [41]. Additionnellement, Domblesky et al. (2003) observent que le taux d'enlèvement de matière est constant en fonction du temps, et ce indépendamment du matériau étudié [23].

En se basant sur ces règles, Hashimoto a constitué un modèle mathématique du procédé. Ce modèle permet d'estimer la rugosité des composants post-traités en fonction du temps (équation 3.1) [29].

$$Ra(t) = (Ir - Dr) \cdot e^{-t/T} + Dr \quad (3.1)$$

où :

- Ir = Rugosité brute
- Dr = Limite de rugosité
- T = Constante de temps du procédé

La constante de temps T est égale au temps de cycle pour lequel la rugosité observée atteint la valeur $Ra(T)$ (équation 3.2).

$$Ra(T) = (Ir - Dr) \cdot e^{-1} + Dr \quad (3.2)$$

En connaissant la constante de temps T , le temps minimal T_{opt} permettant d'atteindre la rugosité cible Ar peut être dérivé (équation 3.3).

$$T_{opt} = -T \cdot \ln \left(\frac{Ar - Dr}{Ir - Dr} \right) \quad (3.3)$$

Alternativement, Sofronas et Taraman (1979) ont utilisé la méthode des surfaces de réponse pour quantifier la réduction de rugosité des pièces (équation 3.4).

$$S = 4.2 \cdot 10^{-9} \cdot T^{0.15} \cdot M^{0.75} \cdot F^{2.93} \quad (3.4)$$

où :

- S = Réduction de rugosité (Ra)
- T = Temps de traitement
- M = Taille des médias
- F = Fréquence de vibration

3.5 Procédés dérivés

Afin d'augmenter la vitesse relative entre les médias et les pièces, celles-ci peuvent être fixées à la cuve. Cela permet de réduire le temps de cycle et d'éviter les chocs entre pièces dans le cas de composants à valeur élevée [18].

La fixation des pièces est souvent liée au procédé de *vibrostrengthening*, qui a pour double objectif d'améliorer l'état de surface des pièces et de leur impartir des contraintes résiduelles de compression. Le procédé peut être considéré comme une alternative au grenailage [18]. L'immobilisation des pièces résulte en un travail mécanique important, ce qui améliore leur tenue en fatigue [18].

3.6 Synthèse

Ci-avant, une revue de littérature a fait ressortir quelques points importants relatifs au procédé de vibrofinish. Ceux-ci sont résumés dans les quelques paragraphes qui suivent.

1. De l'usure adhésive résulte du glissement pièces-médias, alors que les impacts causent une déformation plastique. Trois modes de contact pièces-médias existent dans un vibreur circulaire : impact libre, roulement d'un média sur la surface de la pièce, roulement d'un média sur un autre média immobile. Ces différents contacts altèrent la surface des pièces à travers trois phénomènes distincts : déformation plastique pure, labourage sans copeau, labourage avec copeau.
2. Les creux à la surface des pièces ne sont pas affectés par l'usure adhésive ; en revanche, leur profondeur diminue suite à la déformation plastique de la surface.
3. Un média abrasif avec un grain grossier laissera des rayures profondes à la surface des pièces, et donc un état de surface médiocre.
4. L'enlèvement de matière est plus important avec un taux de remplissage faible.
5. La rugosité des pièces décroît exponentiellement jusqu'à atteindre une limite à partir de laquelle aucune amélioration n'est possible. Le taux d'enlèvement de matière reste constant tout au long du processus.

6. Pour les médias sphériques, l'efficacité du processus est liée à la vitesse relative pièces-médias : plus cette dernière est élevée, plus l'enlèvement de matière est rapide. Une grande différence de densité entre pièces et médias résulte en une vitesse relative importante.
Avec les autres formes de médias, l'enlèvement de matière et la déformation plastique sont liés à la taille des médias.
7. Pour maximiser le taux d'enlèvement de matière, la géométrie des médias doit être choisie de telle sorte à obtenir un contact plan entre les pièces et les médias.
8. Le temps de cycle est inversement proportionnel à la fréquence de vibration et à l'accélération de la cuve. Cependant, l'état de surface après post-traitement peut être négativement influencé par l'augmentation de ces variables.
9. L'amplitude des vibrations est choisie selon les pièces à traiter : amplitude élevée pour les matériaux durs et les pièces lourdes, amplitude faible pour les métaux malléables.
10. Le processus peut être accéléré en fixant les pièces à la cuve, ce qui augmente la différence de vitesse entre pièces et médias.

4 | Eprouvettes de test

4.1 Conception

Le profil des éprouvettes a été choisi de manière à obtenir une large plage de rugosité. Trois géométries ont été retenues (figure 4.1), chacune présentant une surface en porte-à-faux avec une inclinaison différente.

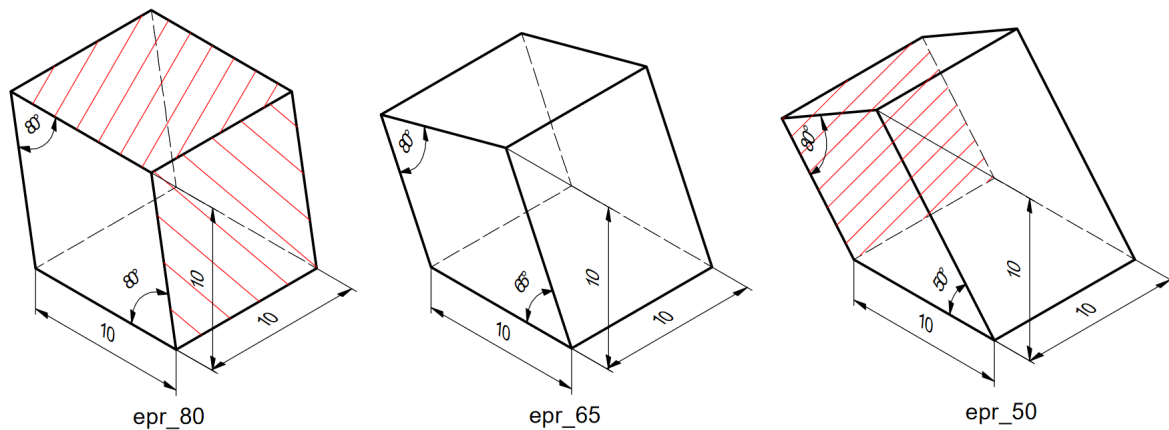


FIGURE 4.1 – Géométrie, dimensions et dénomination des éprouvettes

4.2 Impression des spécimens

4.2.1 Stratégie d'impression

Chacun des trois spécimens détaillés ci-haut a été imprimé en 10 exemplaires. L'impression des 30 spécimens a été faite en une fois sur un plateau de 125 mm × 125 mm. Les éprouvettes sont soutenues par des supports de type bloc de hauteur 4 mm ; la hauteur totale à imprimer est de 14 mm et l'écart minimal entre deux pièces est de 4 mm.

Le positionnement des pièces a été fait avec le logiciel Materialise Magics. Lors de l'impression, le recoater se déplace selon l'axe Y et le flux d'argon est dirigé selon l'axe X (figure 4.2).

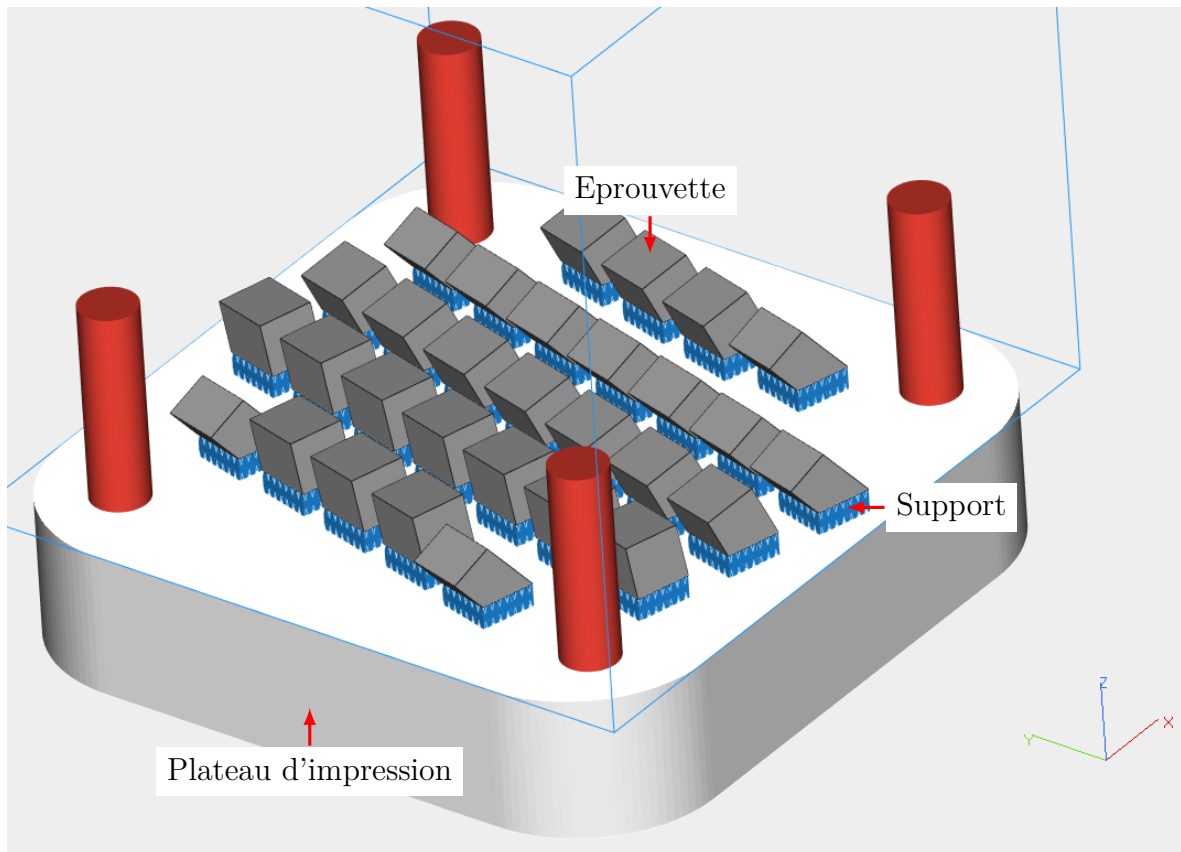


FIGURE 4.2 – Stratégie de fabrication, direction d'impression selon Z (30 pièces)

L'ensemble des pièces est tourné de 15° autour de l'axe Z. Cette rotation a un double objectif :

- Permettre un contact graduel entre les pièces et la lame du recoater
- Eviter le dépôt des particules soufflées par le flux d'argon sur les pièces adjacentes

4.2.2 Machine SLM

Les pièces ont été fabriquées avec une machine SLM 125HL (figure 4.3) de SLM Solutions GmbH (Lübeck). La machine est dotée d'un laser à fibre de 400W (IPG Photonics). L'enveloppe de fabrication de la machine est $125\text{ mm} \times 125\text{ mm} \times 125\text{ mm}$ (sans tenir compte de l'épaisseur du substrat).



FIGURE 4.3 – Machine SLM 125HL [44]

4.2.3 Poudre

La poudre utilisée pour l'impression des spécimens est un acier inoxydable 316L. Elle est fournie par SLM Solutions GmbH (référence 1.4404).

Les caractéristiques de la poudre (table 4.1) et sa composition chimique (table 4.2) sont détaillées ci-après.

TABLE 4.1 – Caractéristiques de la poudre

Taille des particules	10-45 μm
Masse volumique	7.9 g/cm ³
Forme des particules	Sphérique
Conductivité thermique	15 W/(m · K)

TABLE 4.2 – Composition chimique de la poudre

Alliage ferreux 316L 1.4404 (%poids)											
<i>Fe</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Mo</i>	<i>Nb+Ta</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>C</i>	<i>N</i>	<i>O</i>
Balance	16-18	10-14	2-3	-	2	1	0.045	0.03	0.03	0.1	-

4.2.4 Paramètres d'impression

Les paramètres machine 316L_SLM_MBP3.0_30_CE1_400W_LS_V1.0 ont été utilisés pour la fabrication des pièces. Les valeurs importantes de ces paramètres sont résumées dans la table 4.3.

L'impression a duré 4 h et a été faite sous atmosphère protégée (argon).

TABLE 4.3 – Paramètres d'impression

Paramètre		Puissance laser (W)	Vitesse laser (mm/s)	Ecart vecteur (μm)	Épaisseur de couche (μm)	Densité d'énergie (J/mm^3)
Volume	Hatch	175	1100	100	30	53.03
	Fill Contour	100	675	N/A	30	N/A
	Border	100	675	N/A	30	N/A
Downskin	Hatch	80	1000	60	30	44.44
	Fill Contour	80	750	N/A	30	N/A
	Border	100	875	N/A	30	N/A
Upskin	Remelting OFF					
Support	Border	100	875	N/A	30	N/A

5 | Equipement de tribofinition

5.1 Machine de tribofinition

La machine utilisée pour les essais est un vibreur circulaire modèle VibC 25 du fabricant ABC SwissTech. La machine a une puissance de 500 W et la cuve une capacité théorique de 25l.

5.2 Médias

Les médias utilisés (figure 5.1) sont des triangles coupe droite de 15 mm de côté (figure 5.2). Les particules abrasives sont des grains céramiques de taille moyenne. Les médias sont fournis par ABC SwissTech (référence SCT MGA 15).



FIGURE 5.1 – Médias SCT MGA 15

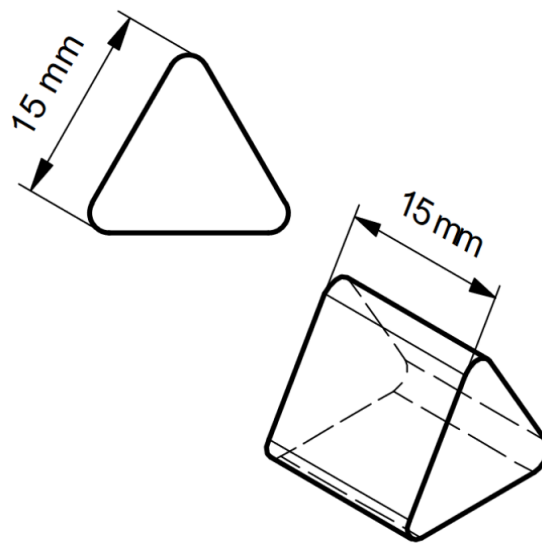


FIGURE 5.2 – Géométrie et dimensions du média abrasif

Avant le début des essais, les médias ont été rodés pendant 12 h dans la machine tournant à vitesse nominale (1430 tr/min).

5.3 Additif

L'additif utilisé est également fourni par ABC SwissTech (référence PULIBRILL 72). Il s'agit d'un additif pour ébavurage, qui permet de nettoyer la surface des pièces en suspendant les particules abrasées.

6 | Microscopie

6.1 Microscope numérique

Les éprouvettes de test ont été étudiées avec un microscope à variation focale Olympus DSX1000, en utilisant un objectif à grossissement 20X.

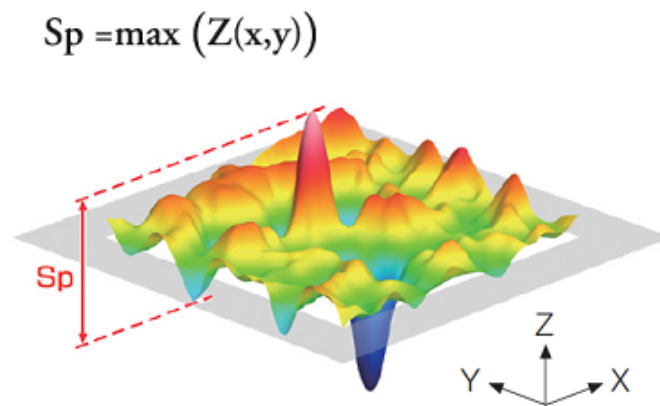
6.2 Mesures de rugosité

Toutes les mesures de rugosité ont été faites sur une surface de $953\ \mu\text{m} \times 953\ \mu\text{m}$. La surface a été filtrée (filtre gaussien, $\lambda_c = 800\ \mu\text{m}$) pour éliminer le profil primaire et l'ondulation. Les observations sont faites avec le mode *fond clair* (BF).

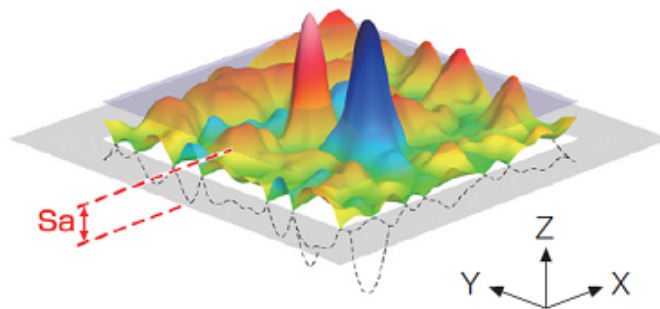
Chaque mesure a été effectuée à un endroit aléatoire situé vers le centre de la surface étudiée. La valeur finale a été moyennée à partir de trois mesures et arrondie au dixième. Avant la mesure, les pièces traitées ont été soumises à un nettoyage à ultrasons dans de l'alcool d'une durée de 2 min.

6.3 Paramètres de rugosité surfacique

Trois paramètres de rugosité ont été étudiés au cours de ce travail : S_p , S_v et S_a . Les paramètres S_p et S_v représentent la hauteur de la crête la plus haute, respectivement du creux le plus profond, par rapport au plan moyen de la surface de mesure (figure 6.1). Le paramètre S_a est la hauteur moyenne arithmétique, soit la moyenne des écarts (en valeur absolue) par rapport au plan moyen de la surface de mesure (figure 6.2).

FIGURE 6.1 – Illustration du paramètre de surface S_p [45]

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x,y)| dx dy$$

FIGURE 6.2 – Illustration du paramètre de surface S_a [45]

Il est à noter que ces paramètres ne suffisent pas à caractériser une surface : ils ne donnent aucune indication sur la distribution pics-vallées, la périodicité des aspérités, la direction des stries, etc. Cependant, dans le cadre de ce travail, il a été décidé d'étudier ces trois paramètres car ils sont les plus représentatifs des surfaces et du procédé étudiés.

7 | Résultats et discussion

7.1 Variation de la topographie des pièces

7.1.1 Déroulement des essais

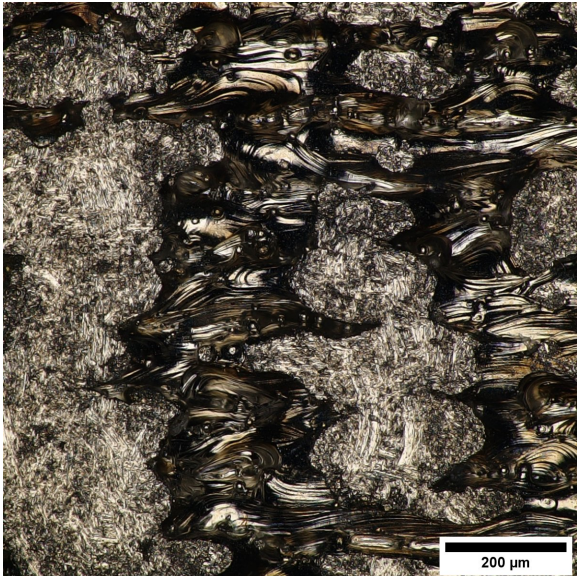
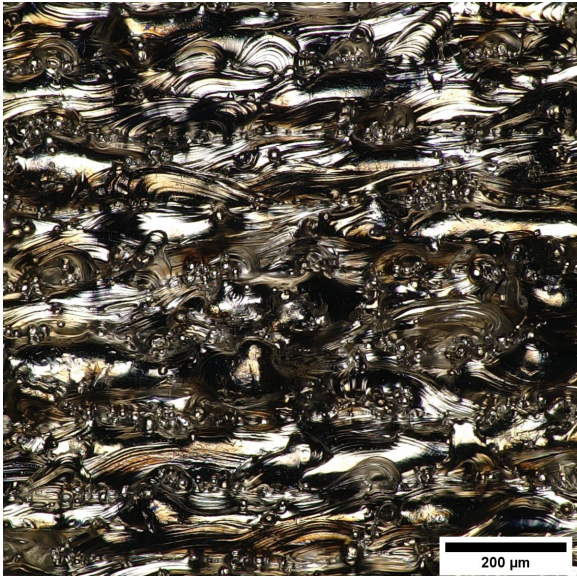
Une éprouvette (epr_65) a été post-traitée à vitesse nominale (1430 tr/min). L'état de surface de toutes les faces de la pièce a été mesuré à intervalles de temps réguliers. Le rayon d'une arête déterminée a également été mesuré à ces mêmes intervalles. L'essai a ensuite été répété à nouveau sur une deuxième éprouvette de même géométrie. Le cycle s'est fait en batch, sans additif, avec 4l d'eau et un taux de remplissage de 70%. Pour prévenir la saturation de l'eau par les particules abrasées, celle-ci a été remplacée toutes les heures.

Trois paramètres de rugosité ont été évalués afin de caractériser l'évolution des surfaces de la pièce : S_p , S_v et S_a . La mesure des rayons a été faite avec le logiciel ImageJ à partir des images au microscope.

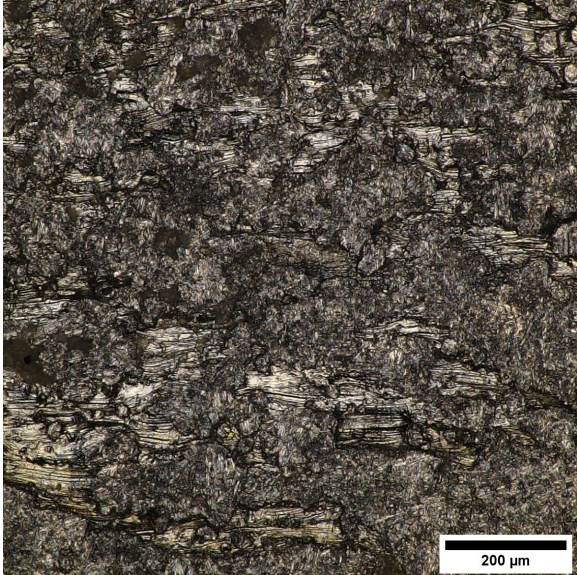
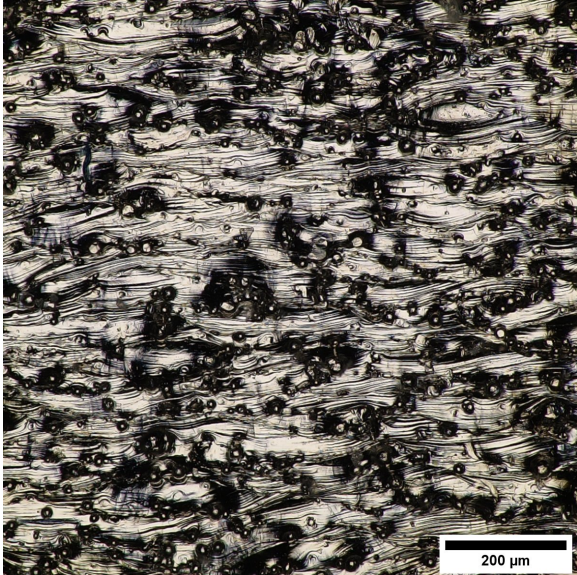
7.1.2 Résultats

Etat de surface

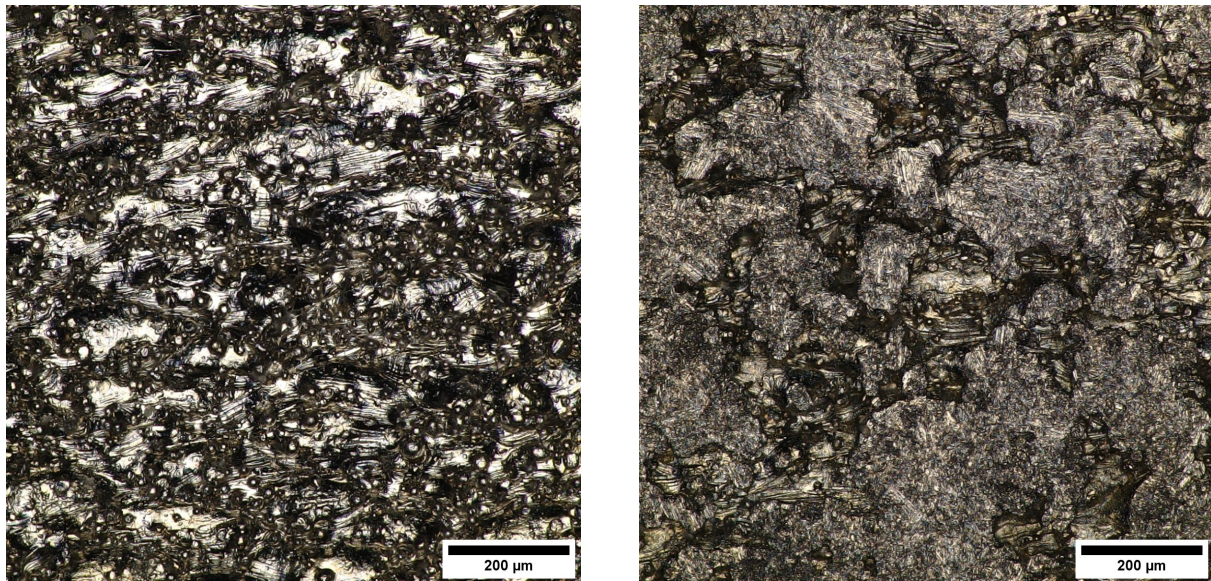
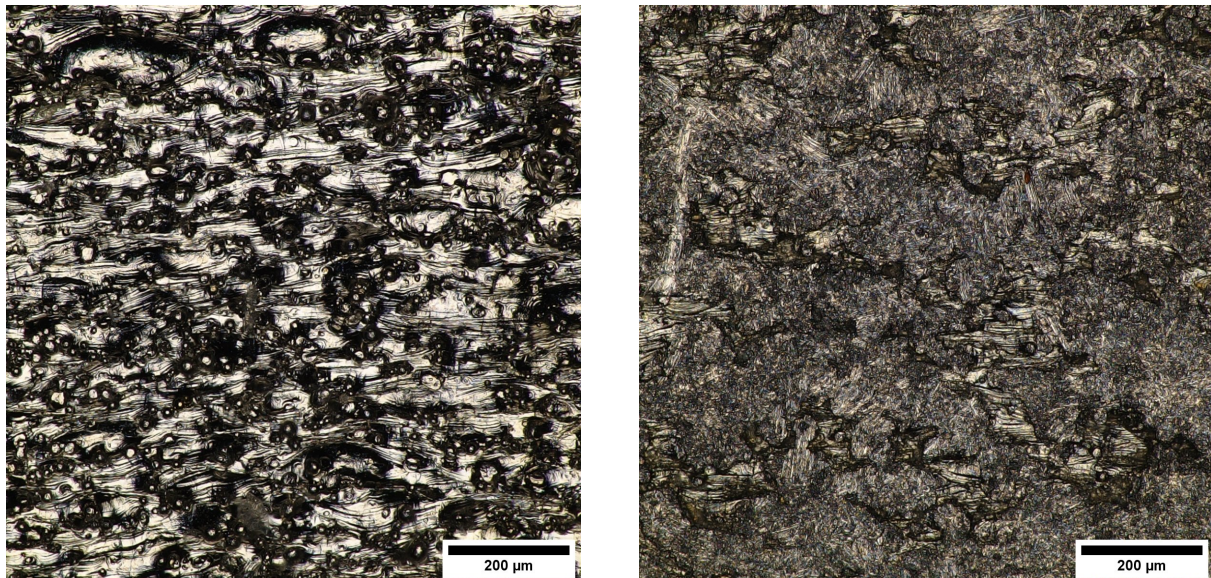
L'évolution des faces de la pièce (annexe C) consiste exclusivement en une abrasion des pics. D'après les images au microscope, les creux sont laissés intacts (figure 7.1). En effet, les médias sont largement trop gros pour pénétrer dans les vallées de la surface. De plus, après rodage, ils ne présentent pas d'angles vifs ou arêtes tranchantes.



(a) Face supérieure



(b) Face *upskin*

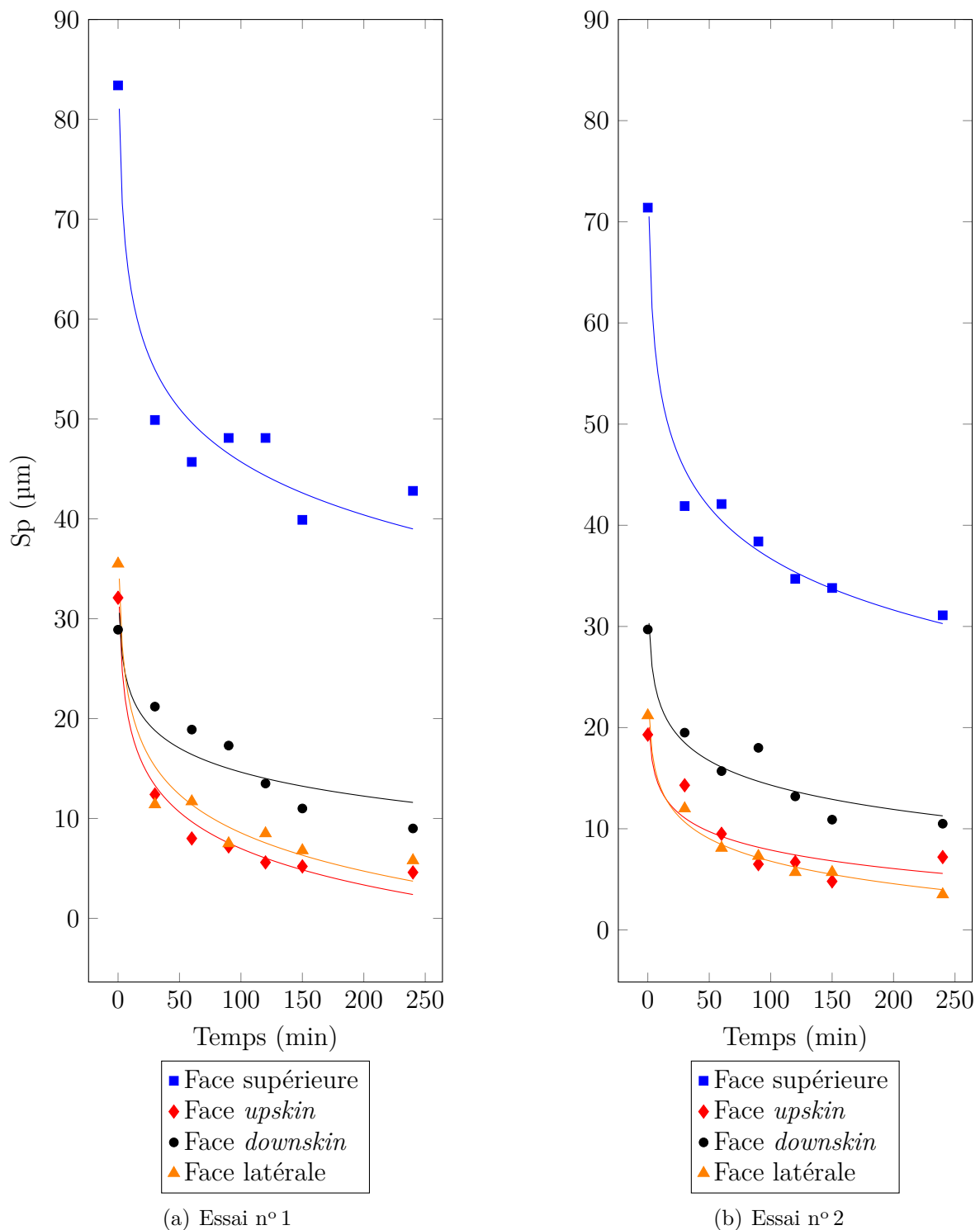
(c) Face *downskin*

(d) Face latérale

FIGURE 7.1 – Faces de l'éprouvette avant post-traitement (gauche) et après 240 min (droite), images de l'essai n° 2

La décroissance de la hauteur des pics est exponentielle et tend vers une valeur limite (figure 7.2). Il convient de noter que cette limite de rugosité n'est toujours pas atteinte après 4 h de post-traitement, et ce pour aucune des surfaces. Les surfaces plus grossières évoluent plus rapidement, mais la saturation survient à un niveau de rugosité plus élevé. Ainsi, le post-traitement ne permet pas d'éliminer les traces de passage du laser sur la face supérieure de l'éprouvette.

En revanche, sur les trois autres faces, les particules de poudre partiellement collées sont presque totalement abrasées, laissant à la place une texture de surface isotrope.

FIGURE 7.2 – Evolution du paramètre Sp en fonction du temps de cycle

Avec l'abrasion des pics, la ligne moyenne du profil baisse ; en conséquence, si les vallées ne sont pas affectées par l'abrasion, une diminution du paramètre Sv (profondeur de creux maximale) est attendue.

Toutefois, en se référant à la figure 7.3 et en tenant compte de la dispersion des mesures

(annexe B), il est difficile de discerner une tendance claire. En conséquence, au vu de la forte dispersion des mesures, il est conclu que la profondeur des creux ne varie pas de manière significative.

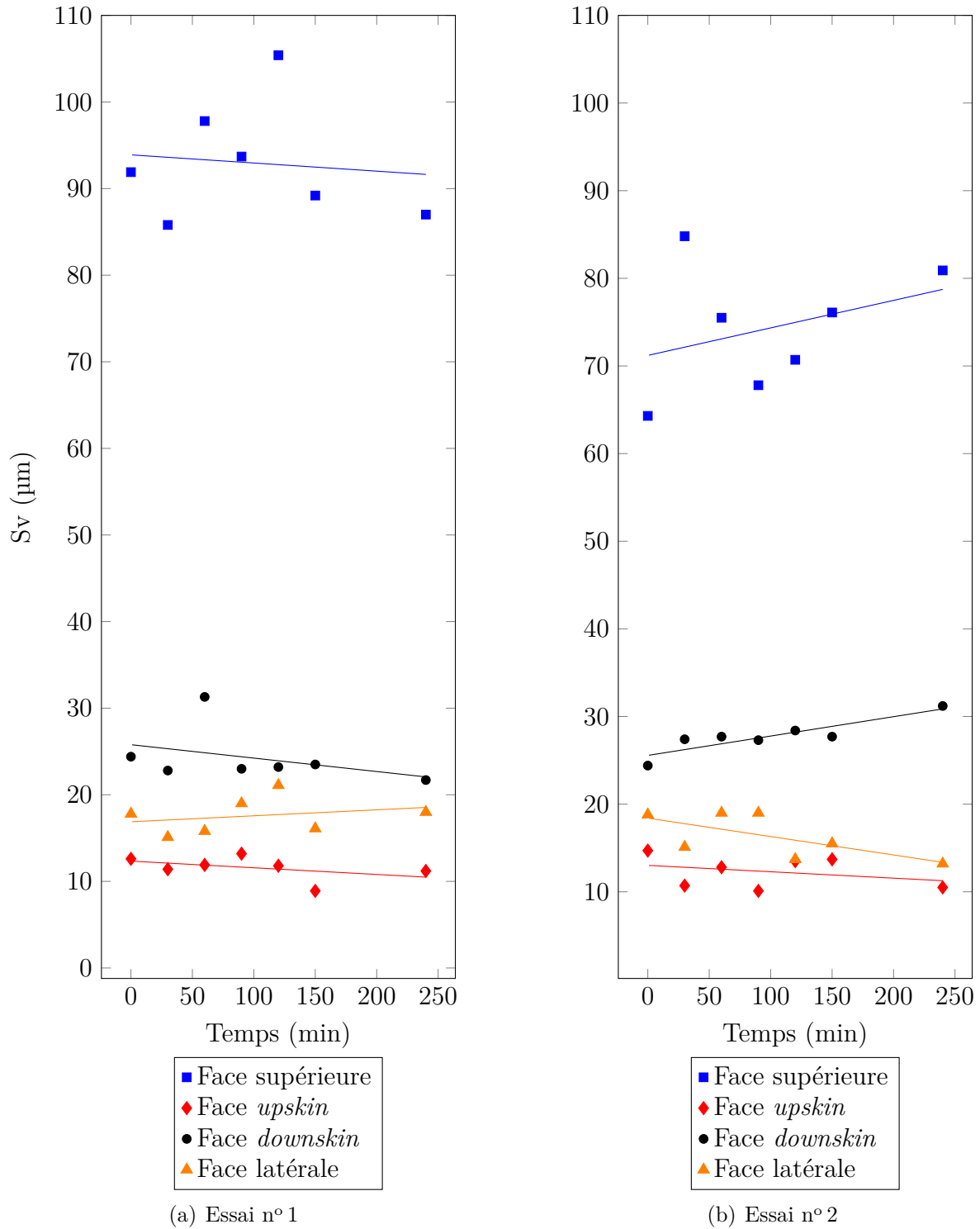
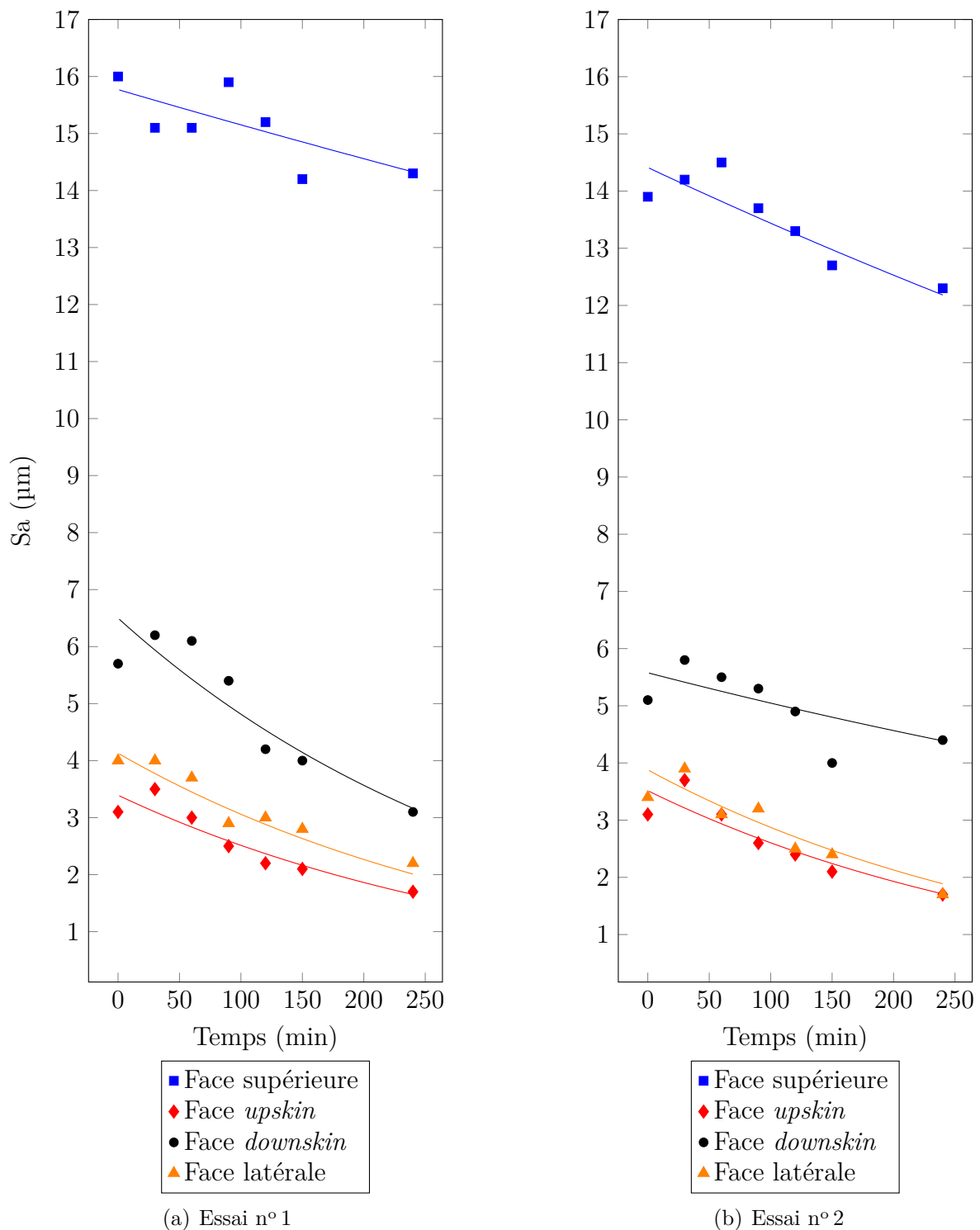


FIGURE 7.3 – Evolution du paramètre S_v en fonction du temps de cycle

La hauteur moyenne arithmétique (Sa) subit également une décroissance exponentielle (figure 7.4). Après 240 min de post-traitement, une rugosité de $Sa\ 1.7 \pm 0.2\ \mu\text{m}$ a pu être obtenue pour les faces latérales et *upskin*, sachant que les valeurs de départ étaient respectivement $3.4 \pm 0.1\ \mu\text{m}$ et $3.1 \pm 0.5\ \mu\text{m}$ (essai n° 2). Il est à noter que, pour ces surfaces isotropes, les valeurs Sa et Ra sont très proches et donc directement comparables. Ce n'est toutefois pas le cas de la face supérieure.

Il s'agit ici d'un résultat intéressant ; pour rappel, les standards de l'aérospatiale requièrent une rugosité maximale de Ra $3.2\ \mu\text{m}$. Avec un temps de cycle plus long, il est sans doute possible d'obtenir, grâce à la tribofinition, des rugosités inférieures à Sa $3\ \mu\text{m}$. En revanche, une telle valeur ne sera jamais atteinte sur la face supérieure, dont la rugosité est passée de Sa $13.9 \pm 0.5\ \mu\text{m}$ à $12.2 \pm 0.4\ \mu\text{m}$, soit une diminution de $12 \pm 6\%$ (essai n° 2). La diminution la plus élevée est observée sur les faces latérales, où la valeur Sa a été réduite de moitié ($50 \pm 7\%$, essai n° 2).

FIGURE 7.4 – Evolution du paramètre S_a en fonction du temps de cycle

En définitive, un temps de cycle très long (de l'ordre de 6 à 8 h) sera nécessaire pour atteindre la limite de rugosité sur toutes les surfaces observées. Avec un tel temps de cycle, l'accumulation de particules abrasées devient un problème majeur ; l'eau saturée va alors absorber les impacts et réduire l'enlèvement de matière. En conséquence, un système de

circulation en continu doit impérativement être mis en place. L'utilisation d'un additif permettant de nettoyer la surface des pièces peut également s'avérer bénéfique.

Les états de surface obtenus sont généralement intéressants, avec des valeurs parfois inférieures à $Sa\ 2\ \mu\text{m}$ (faces latérales et *upskin*). Cependant, le procédé ne permet pas d'éliminer les sillons laissés par le laser sur la face supérieure. Cette face reste donc particulièrement grossière ($Sa\ 12\text{-}15\ \mu\text{m}$) après 4 h de post-traitement, même si la limite de rugosité n'a pas été atteinte.

Afin de maximiser la qualité des pièces post-traitées, il est donc impératif d'optimiser les paramètres d'impression SLM de sorte à obtenir un bon état de surface brut. En particulier, pour les faces supérieures, l'utilisation de la fonction *remelting* peut permettre d'améliorer l'état de surface par un deuxième passage du laser. Cette optimisation des paramètres d'impression permettra d'obtenir des rugosités faibles après post-traitement ; en revanche, le temps de cycle ne sera pas réduit.

Pour le traitement des surfaces très rugueuses, le procédé semble trop peu énergétique ; les équipements à haute énergie comme les centrifugeuses sont vraisemblablement plus adaptés à ce type de surfaces. En revanche, la machine VibC 25 pourrait se montrer particulièrement intéressante pour le traitement des métaux doux comme l'aluminium.

Arêtes

L'évolution du rayon d'arête suit une courbe logarithmique (figure 7.5). Après 4 h de post-traitement, celui-ci mesure environ 0.4 mm, alors que la valeur évolue encore.

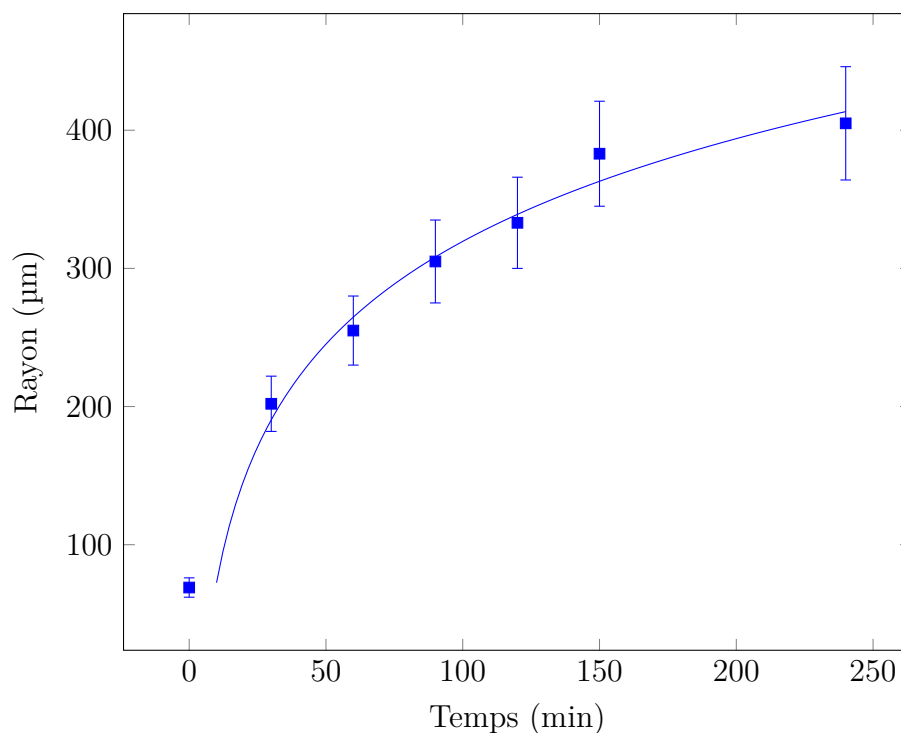


FIGURE 7.5 – Evolution du rayon d'arête en fonction du temps de cycle

Les arêtes de la pièce sont les zones où l'enlèvement de matière semble le plus important (figure 7.6). En effet, le contact entre les médias et les arêtes de la pièce est de type linéaire (chapitre 3.3.2). Lors des impacts de médias sur les arêtes de la pièce, l'intégralité de la force d'impact est distribuée sur une surface très petite ; en conséquence, l'enlèvement de matière est plus important que sur les faces planes.

Avec ces paramètres d'essais, le procédé permet donc d'obtenir un ébavurage efficace des pièces. En seulement 30 min, le rayon d'arête a été porté de $69 \pm 7 \mu\text{m}$ à $202 \pm 20 \mu\text{m}$.

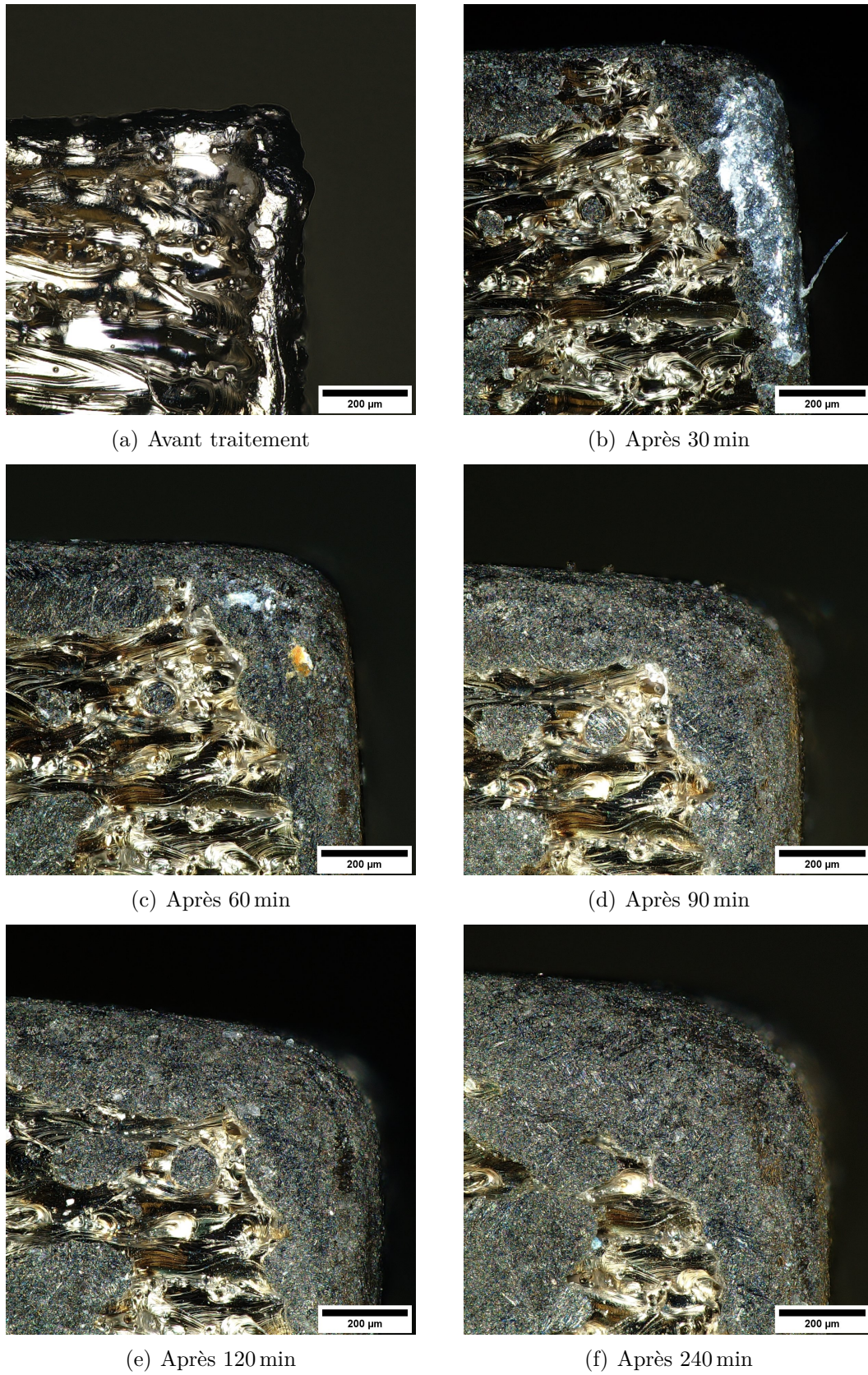


FIGURE 7.6 – Evolution de l'arête étudiée

7.2 Influence des paramètres du procédé

7.2.1 Déroulement des essais

Généralités

Les éprouvettes brutes sont post-traitées par tribofinition selon une matrice expérimentale pré-établie. Après chaque essai, la surface du spécimen testé est caractérisée. A partir des données récoltées, une analyse statistique est effectuée. Celle-ci a pour objectif de comprendre l'impact des différents paramètres sur la rugosité des éprouvettes post-traitées.

Plan d'expériences

Le plan d'expériences est défini à l'aide de Design-Expert. Celui-ci est un plan I-optimal en 27 essais (fraction $1/2$). Il inclut toutes les interactions du 2^{ème} degré et comprend 3 facteurs à 3 niveaux et un facteur à 2 niveaux (7.1).

TABLE 7.1 – Facteurs et niveaux

Facteur	Niveaux
<i>Temps de cycle</i>	30 min
	135 min
	240 min
<i>Etat de surface brut</i>	Fin
	Moyen
	Grossier
<i>Vitesse moteur</i>	1000 tr/min
	1250 tr/min
	1500 tr/min
<i>Additif</i>	Aucun
	PULIBRILL 72

La vitesse de rotation du moteur, l'utilisation ou non d'additif, le temps de post-traitement et l'état de surface brut des spécimens ont été choisis comme facteurs. La variable de réponse est la diminution du paramètre S_p entre le début et la fin de l'essai. La matrice expérimentale est résumée dans la table 7.2.

TABLE 7.2 – Matrice expérimentale

N° essai	Vitesse moteur (tr/min)	Temps (min)	Etat de surface	Additif
1	1500	30	Grossier	PULIBRILL 72
2	1250	240	Grossier	Aucun
3	1500	240	Fin	Aucun
4	1500	135	Moyen	Aucun
5	1000	135	Moyen	PULIBRILL 72
6	1500	30	Grossier	Aucun
7	1250	30	Grossier	PULIBRILL 72
8	1000	135	Moyen	Aucun
9	1000	30	Fin	PULIBRILL 72
10	1500	240	Moyen	PULIBRILL 72
11	1250	30	Grossier	PULIBRILL 72
12	1000	30	Moyen	Aucun
13	1000	135	Moyen	PULIBRILL 72
14	1000	240	Fin	Aucun
15	1000	240	Moyen	Aucun
16	1250	30	Fin	Aucun
17	1500	135	Moyen	PULIBRILL 72
18	1000	30	Grossier	PULIBRILL 72
19	1000	240	Grossier	PULIBRILL 72
20	1250	135	Fin	PULIBRILL 72
21	1500	30	Moyen	PULIBRILL 72
22	1500	135	Moyen	Aucun
23	1500	135	Grossier	PULIBRILL 72
24	1250	135	Fin	PULIBRILL 72
25	1250	30	Fin	Aucun
26	1250	240	Grossier	PULIBRILL 72
27	1000	135	Grossier	Aucun

Les faces des éprouvettes correspondant aux trois niveaux du facteur *état de surface* sont les surfaces hachurées dans la figure 4.1, respectivement :

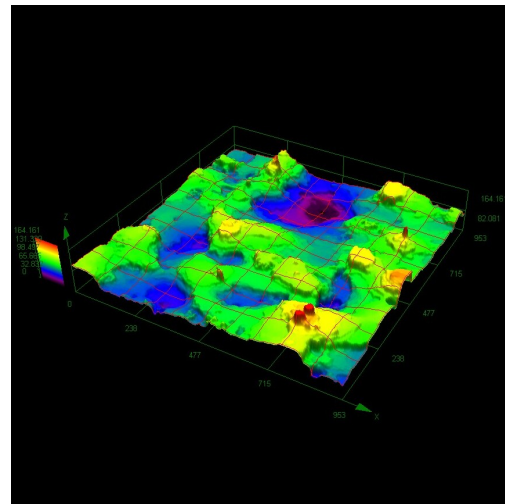
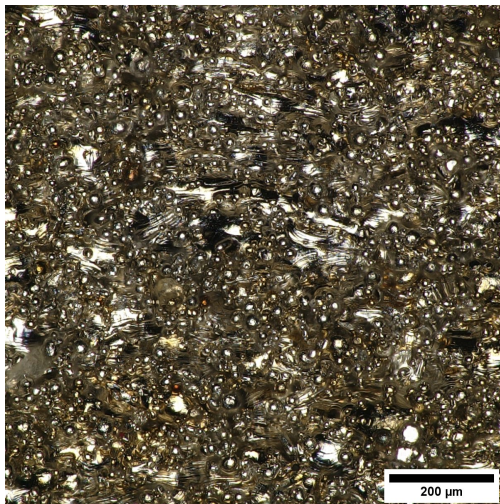
- Face *upskin*, epr_80 (fin)
- Face supérieure, epr_80 (moyen)
- Face *downskin*, epr_50 (grossier)

Chacune de ces surfaces présente une topographie typique de pièces fabriquées par procédé SLM (figure 7.7).

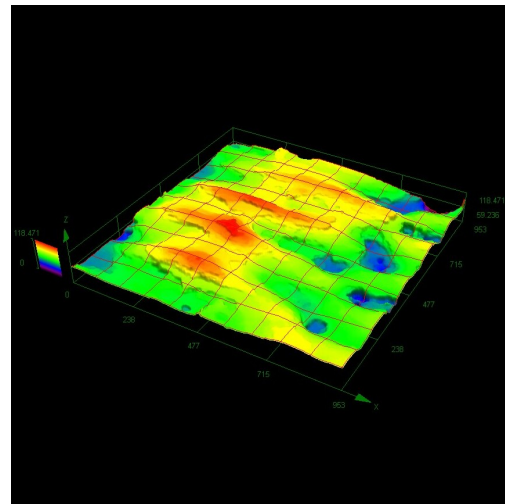
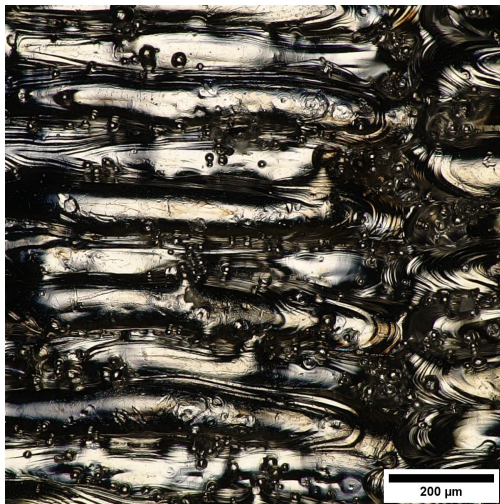
La surface « grossière » est caractérisée par un fort relief et la présence de très nombreuses particules de poudre partiellement fondues.

La surface « moyenne » présente un profil directionnel, le laser laissant un sillon à son passage (périodicité du sillon 150 μm). Cette surface comporte comparativement peu de particules de poudre partiellement fondues.

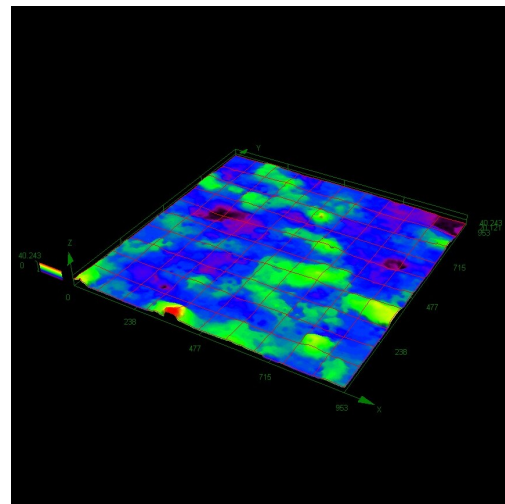
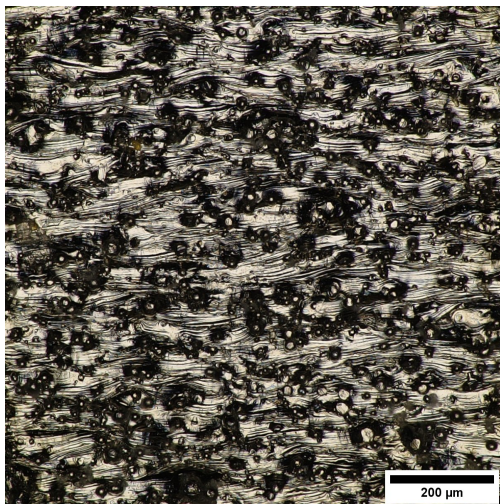
Enfin, la surface « fine » possède un relief peu marqué, avec la présence de quelques particules de poudre collées.



(a) Face *downskin*, epr_50 (grossier)



(b) Face supérieure, epr_80 (moyen)



(c) Face *upskin*, epr_80 (fin)

FIGURE 7.7 – Surfaces étudiées

Paramètres d'essais

Le taux de remplissage de la cuve est de 70 %, ce qui correspond à 17.5 l ou 25 kg de médias. Le taux de remplissage a été gardé constant tout au long des essais par ajout de nouveaux médias pour compenser leur usure.

Tous les cycles sont faits en circuit fermé. Le mélange lubrifiant se compose de 4 l d'eau et, lorsque celui-ci a été utilisé, de 300 ml d'additif (PULIBRILL 72). A la fin de chaque essai, la cuve est purgée du liquide, qui est ensuite changé. Une à deux éprouvettes sont testées à chaque cycle (volume d'une pièce 0.75 cm³).

7.2.2 Résultats

Une analyse de la variance (ANOVA) est faite sur les données brutes (annexe A). Le modèle considéré comprend les termes de 1^{er} degré et les interactions. Le seuil de signification α est fixé à 0.05. Selon la table 7.3, seuls les termes du modèle dont la valeur P est inférieure à α sont significatifs.

TABLE 7.3 – Table ANOVA

	Sum Sq	df	Mean Sq	F-value	P-value	
Modèle	2722.89	14	194.49	5.09	0.0038	Significatif
A — Vitesse	176.02	1	176.02	4.61	0.0529	
B — Temps	344.16	1	344.16	9.02	0.0110	Significatif
C — Etat de surface	675.22	2	337.61	8.84	0.0044	Significatif
D — Additif	272.48	1	272.48	7.14	0.0204	Significatif
AB	74.32	1	74.32	1.95	0.1882	
AC	438.12	2	219.06	5.74	0.0178	Significatif
AD	0.5448	1	0.5448	0.0143	0.9069	
BC	189.67	2	94.84	2.48	0.1251	
BD	84.19	1	84.19	2.21	0.1633	
CD	193.36	2	96.68	2.53	0.1209	
Résidus	458.11	12	38.18			
Lack of Fit	160.79	7	22.97	0.3863	0.8764	Non-significatif
Erreur pure	297.32	5	59.46			

L'interaction entre les facteurs *vitesse* et *état de surface* est significative ($P < 0.05$). Cela signifie que la relation entre un de ces facteurs et la réponse dépend de l'autre facteur. Par conséquent, les effets de ces facteurs ne peuvent être analysés indépendamment. D'après la figure 7.8, l'augmentation de la vitesse de rotation a un effet négatif sur les surfaces « fines » et « moyennes », et un effet positif sur les surfaces « grossières ». Cette interaction semble difficile à expliquer, et de nouveaux essais sont nécessaires afin de confirmer ou d'infirmer cette tendance.

De plus, l'effet principal de la vitesse (figure 7.9) n'est pas significatif. Pour rappel, d'après Pandiyan et al. (2016), l'augmentation de la fréquence de vibration améliore la circulation

des médias et engendre une abrasion plus importante. Là encore, de nouveaux essais semblent nécessaires.

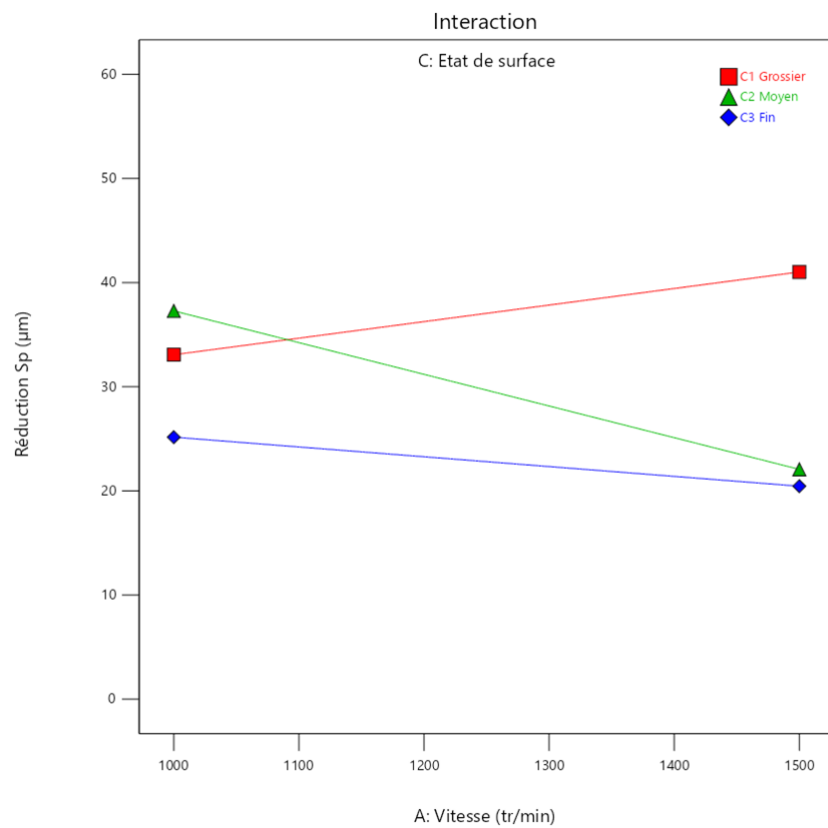


FIGURE 7.8 – Interaction vitesse/état de surface (les autres variables sont à leur valeurs moyennes)

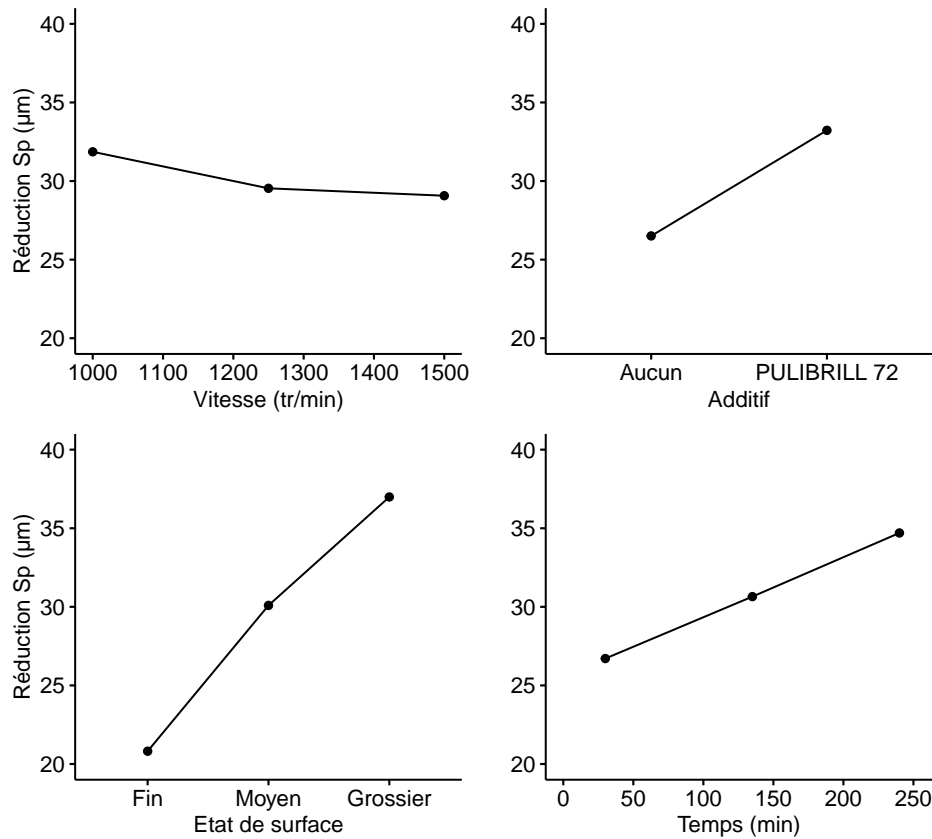


FIGURE 7.9 – Effets principaux des facteurs (les autres variables sont à leur valeurs moyennes)

Additionnellement, le graphique des effets principaux indique que l'ajout d'additif permet d'améliorer de façon significative la réduction de Sp, son effet étant similaire à celui du temps. L'utilisation d'additif est donc fortement recommandée, en particulier pour les traitements en circuit fermé où un système de dosage n'est pas nécessaire.

Enfin, l'état de surface des pièces brutes est de loin le facteur le plus influent du procédé. Plus la surface de base est grossière, plus la réduction de la hauteur des pics sera marquée. En revanche, comme mentionné plus haut, la valeur limite sera bien plus élevée. Le procédé présente donc une bonne capabilité pour l'élimination rapide des pics de rugosité sur les surfaces très rugueuses.

8 | Conclusion

Après une période préliminaire de recherche de littérature, 30 éprouvettes en acier 316L ont été produites par procédé SLM dans le but de réaliser divers essais. La géométrie de ces éprouvettes a été choisie de sorte à obtenir différents états de surfaces.

Lors des premiers essais, deux éprouvettes de même géométrie ont été post-traitées et l'évolution de leurs faces a été mesurée à intervalles réguliers. Afin de caractériser l'évolution de ces faces, différentes caractéristiques des pièces ont été étudiées. A partir de ces essais, quelques observations notables ont pu être faites :

- L'abrasion concerne uniquement les pics de rugosité ; les creux sont laissés intacts, comme l'attestent les images au microscope et l'évolution du paramètre S_v , pour lequel aucune tendance claire n'est observable.
- La décroissance du paramètre S_p est exponentielle et tend vers une valeur limite. Cependant, sous les conditions d'essais, un temps de cycle de 4 h n'a pas suffi à atteindre cette valeur limite. Pour obtenir de meilleurs résultats, des cycles plus longs (6-8 h) seront nécessaires.
- La valeur limite dépend de la texture de surface initiale de la pièce ; si la pièce brute est très rugueuse, le post-traitement ne permettra pas d'atteindre des rugosités très faibles.
- Les arêtes des pièces sont les zones les plus impactées par l'abrasion. Un rayon d'arête se développe rapidement et atteint 0.4 mm après 4 h de post-traitement.

Dans un deuxième temps, une approche expérimentale de type DOE a été employée afin d'évaluer l'influence de quatre paramètres et leurs éventuelles interactions : le temps de cycle, l'état de surface brut, la vitesse moteur et l'ajout d'additif. L'analyse des données récoltées a permis de relever les points suivants :

- Les termes significatifs sont l'additif, le temps de cycle, l'état de surface brut et l'interaction entre la vitesse et l'état de surface brut.
- L'augmentation de la vitesse pourrait avoir une influence positive sur les surfaces grossières, et négative sur les surfaces plus fines. Cependant, de nouveaux essais sont nécessaires afin de confirmer cette observation.
- L'état de surface brut est le facteur le plus influent sur la réduction du paramètre S_p . Ainsi, l'enlèvement de matière est plus conséquent sur les surfaces rugueuses.
- L'ajout d'additif permet d'obtenir un état de surface significativement meilleur.

En définitive, si le procédé permet de réduire rapidement la rugosité des surfaces grossières, des rugosités très faibles ne sont pas atteignables pour ce type de surfaces. Les machines à haute énergie comme les centrifugeuses sont vraisemblablement plus adaptées dans ce cas de figure.

Alternativement, si l'objectif est d'obtenir une rugosité très faible ($S_a < 3 \mu\text{m}$), alors les efforts doivent être concentrés sur l'optimisation des paramètres SLM, de sorte à obtenir une surface imprimée exempte de défauts majeurs.

Bibliographie

- [1] Sébastien PILLOT. *Fusion laser sélective de lit de poudres métalliques*. 2016.
- [2] Alberto BOSCHETTO et al. “Post-processing of complex SLM parts by barrel finishing”. In : *Applied Sciences* (2020).
- [3] Yusuf KAYNAK et Ozhan KITAY. “The effect of post-processing operations on surface characteristics of 316L stainless steel produced by selective laser melting”. In : *Additive Manufacturing* (2019).
- [4] N. N. KUMBHAR et A. V. MULAY. “Post-processing methods used to improve surface finish of products which are manufactured by additive manufacturing technologies : a review”. In : *Journal of the Institution of Engineers (India)* (2016).
- [5] *Fabrication additive métallique - les fondamentaux*. 2019.
- [6] Ahmed H. MAAMOUN et al. “Effect of selective laser melting process parameters on the quality of Al alloy parts : powder characterization, density, surface roughness, and dimensional accuracy”. In : *Materials* (2018).
- [7] Martin LEARY et al. “Mechanical and thermal characterisation of AlSi10Mg SLM block support structures”. In : *Materials and Design* (2019).
- [8] Jakub MESICEK et al. “Abrasive surface finishing on SLM 316L parts fabricated with recycled powder”. In : *Applied Sciences* (2021).
- [9] Mikdam JAMAL et Michael N. MORGAN. “Design process control for improved surface finish of metal additive manufactured parts of complex build geometry”. In : *Inventions* (2017).
- [10] Prospera Sonuo SIBANDA et al. “State of the art in surface finish of metal additive manufactured parts”. In : 2020.
- [11] Arfan MAJEED et al. “Surface quality improvement by parameters analysis, optimization and heat treatment of AlSi10Mg parts manufactured by SLM additive manufacturing”. In : *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* (2019).
- [12] Eleonora ATZENI et al. “Performance assessment of a vibro-finishing technology for additively manufactured components”. In : *Procedia CIRP* (2020).
- [13] S. BAGEHORN, J. WEHR et H. J. MAIER. “Application of mechanical surface finishing processes for roughness reduction and fatigue improvement of additively manufactured Ti-6Al-4V parts”. In : *International Journal of Fatigue* (2017).
- [14] F. CABANETTES et al. “Topography of as-built surfaces generated in metal additive manufacturing : a multi-scale analysis from form to roughness”. In : *Precision Engineering* (2018).
- [15] P. ROCHUS et al. “Surface engineering for parts made by additive manufacturing”. In : 2015.

- [16] Wit GRZESIK, Bodgan KRUSZYNSKI et Adam RUSZAJ. "Surface integrity of machined surfaces". In : *Surface Integrity in Machining*. 2010.
- [17] Products FINISHING. URL : www.pfonline.com/articles.
- [18] R. MEDIRATTA, K. AHLUWALIA et S. H. YEO. "State-of-the-art on vibratory finishing in the aviation industry : an industrial and academic perspective". In : *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2016).
- [19] S. WANG, R. S. TIMSIT et J. K. SPELT. "Experimental investigation of vibratory finishing of aluminum". In : *Wear* (2000).
- [20] F. SALVATORE et al. "Experimental and numerical study of media action during tribofinishing in the case of SLM titanium parts". In : *Procedia CIRP* (2017).
- [21] Irati MALKORRA et al. "The influence of the process parameters of drag finishing on the surface topography of aluminium samples". In : *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* (2020).
- [22] ABC SWISSTECH. *Bases de la tribofinition*. URL : www.abcswisstech.com/tribofinition.
- [23] J. DOMBLESKY, V. CARIAPA et R. EVANS. "Investigation of vibratory bowl finishing". In : *International Journal of Production Research* (2003).
- [24] Fukuo HASHIMOTO, Stephen P. JOHNSON et Rahul G. CHAUDHARI. "Modeling of material removal mechanism in vibratory finishing process". In : *CIRP Annals* (2016).
- [25] ENGINEERING360. *Vibratory finishers and mass finishing machines information*. URL : www.globalspec.com.
- [26] RÖSLER. URL : www.roslerblog.com.
- [27] William P. NEBIOLO. "Vibratory bowl optimization by proper mechanical set-up and the use of chemical accelerators to virtually eliminate hand polishing of steel parts". In : 2005.
- [28] A. YABUKI, J. K. SPELT et M. R. BAGHBANAN. "Contact forces and mechanisms in a vibratory finisher". In : *Wear* (2002).
- [29] Fukuo HASHIMOTO. "Modelling and optimization of vibratory finishing process". In : *Annals of the CIRP* (1996).
- [30] Sarthak SRIVASTAVA, Chua ZHEN QIN et Sylvie CASTAGNE. "Effect of workpiece orientation, lubrication and media geometry on the effectiveness of vibratory finishing of Al6061". In : 2015.
- [31] Jayesh Abhay NAVARE. "Experimental and computational evaluation of a vibratory finishing process". Mém. de mast. University of North Carolina, 2017.
- [32] Vibra Finish COMPANY. URL : www.vibrafinish.com.
- [33] William P. NEBIOLO. "Calculating applied media force during vibratory finishing". In : 2016.
- [34] John B. KITTREDGE. *Understanding vibratory finishing*. 1981. URL : www.pfonline.com/articles/understanding-vibratory-finishing-revisited.
- [35] NIST/SEMATECH. *e-Handbook of statistical methods*. URL : www.itl.nist.gov/div898/handbook.
- [36] Gregory D. BOWDEN, Bernd J. PICHLER et Andreas MAURER. "A Design of Experiments (DoE) approach accelerates the optimization of copper-mediated ¹⁸F-Fluorination reactions of arylstannanes". In : *Scientific Reports* (2019).

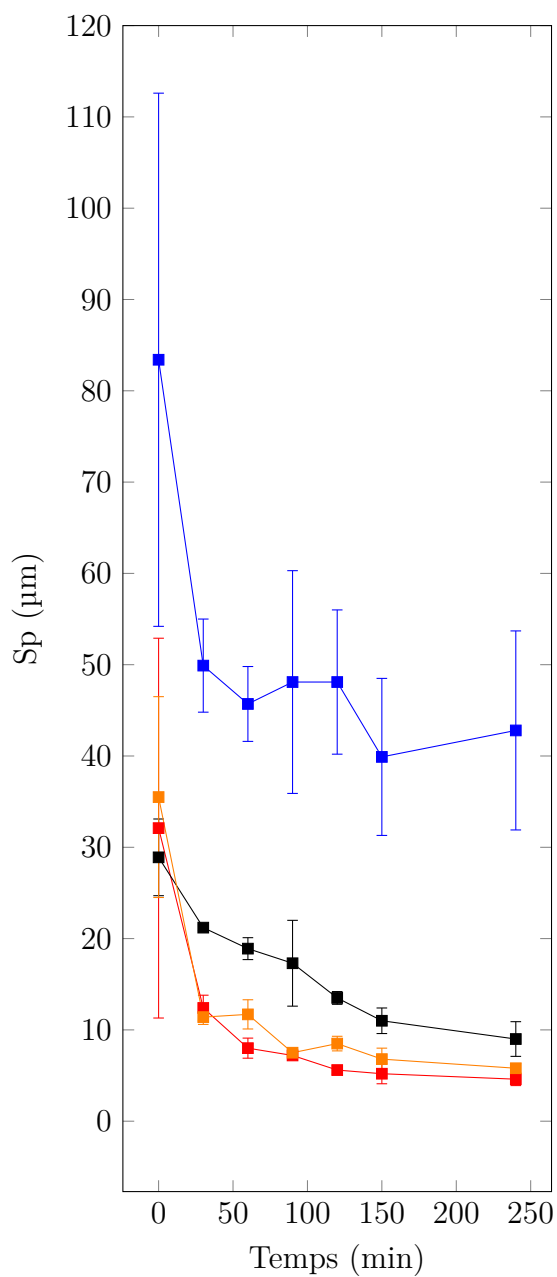
- [37] Catalysis CONSULTING. *What is experimental design ?* URL : www.catalysisconsulting.co.uk.
- [38] Farzad AZIMI et al. "Correlations between media-workpiece contact modes occurring during vibrational finishing and the resulting workpiece topography". In : 2015.
- [39] William P. NEBIOLO. "Considerations regarding the proper loading of vibratory finishing bowls for optimal quality, performance and throughput efficiency". In : 2013.
- [40] Pradeep Kumar PRAKASAM. "Experimental investigation of surface modification mechanism in vibratory finishing process". Thèse de doct. Nanyang Technological University, 2015.
- [41] Eckart UHLMANN, Arne DETHLEFS et Alexander EULITZ. "Investigation of material removal and surface topography formation in vibratory finishing". In : *Procedia CIRP* (2014).
- [42] Irati MALKORRA et al. "Influence of lubrication condition on the surface integrity induced during drag finishing". In : *Procedia CIRP* (2020).
- [43] Vigneashwara PANDIYA, Sylvie CASTAGNE et S. SUBBIAH. "High frequency and amplitude effects in vibratory media finishing". In : *Procedia Manufacturing* (2016).
- [44] SLM SOLUTIONS. URL : www.slm-solutions.com.
- [45] Olympus IMS. *Surface roughness measurement - Parameters*. URL : www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters.

Annexes

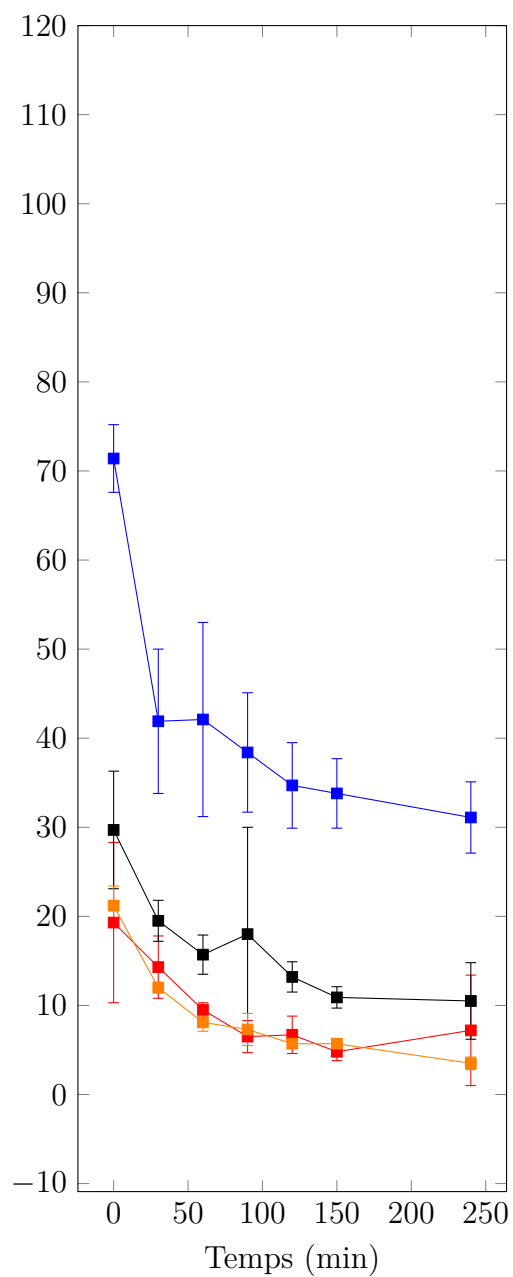
A | Résultats des essais

N° essai	Vitesse moteur (tr/min)	Temps (min)	Etat de surface	Additif	Réduction Sp (µm)
1	1500	30	Grossier	PULBRILL 72	33.4
2	1250	240	Grossier	Aucun	40.6
3	1500	240	Fin	Aucun	20.2
4	1500	135	Moyen	Aucun	11.7
5	1000	135	Moyen	PULBRILL 72	36.0
6	1500	30	Grossier	Aucun	41.1
7	1250	30	Grossier	PULBRILL 72	34.3
8	1000	135	Moyen	Aucun	30.7
9	1000	30	Fin	PULBRILL 72	6.0
10	1500	240	Moyen	PULBRILL 72	30.4
11	1250	30	Grossier	PULBRILL 72	34.3
12	1000	30	Moyen	Aucun	30.1
13	1000	135	Moyen	PULBRILL 72	52.5
14	1000	240	Fin	Aucun	35.6
15	1000	240	Moyen	Aucun	30.2
16	1250	30	Fin	Aucun	24.3
17	1500	135	Moyen	PULBRILL 72	33.1
18	1000	30	Grossier	PULBRILL 72	27.3
19	1000	240	Grossier	PULBRILL 72	42.7
20	1250	135	Fin	PULBRILL 72	28.0
21	1500	30	Moyen	PULBRILL 72	28.2
22	1500	135	Moyen	Aucun	18.0
23	1500	135	Grossier	PULBRILL 72	45.5
24	1250	135	Fin	PULBRILL 72	23.5
25	1250	30	Fin	Aucun	8.1
26	1250	240	Grossier	PULBRILL 72	43.2
27	1000	135	Grossier	Aucun	27.5

B | Evolution des paramètres de rugosité

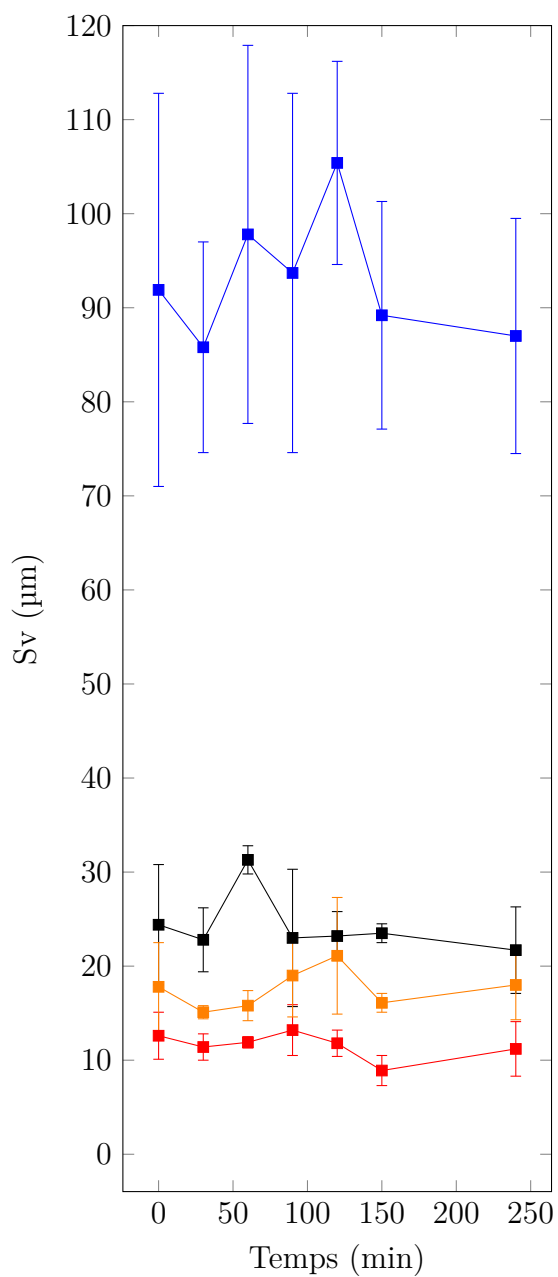


(a) Essai n° 1

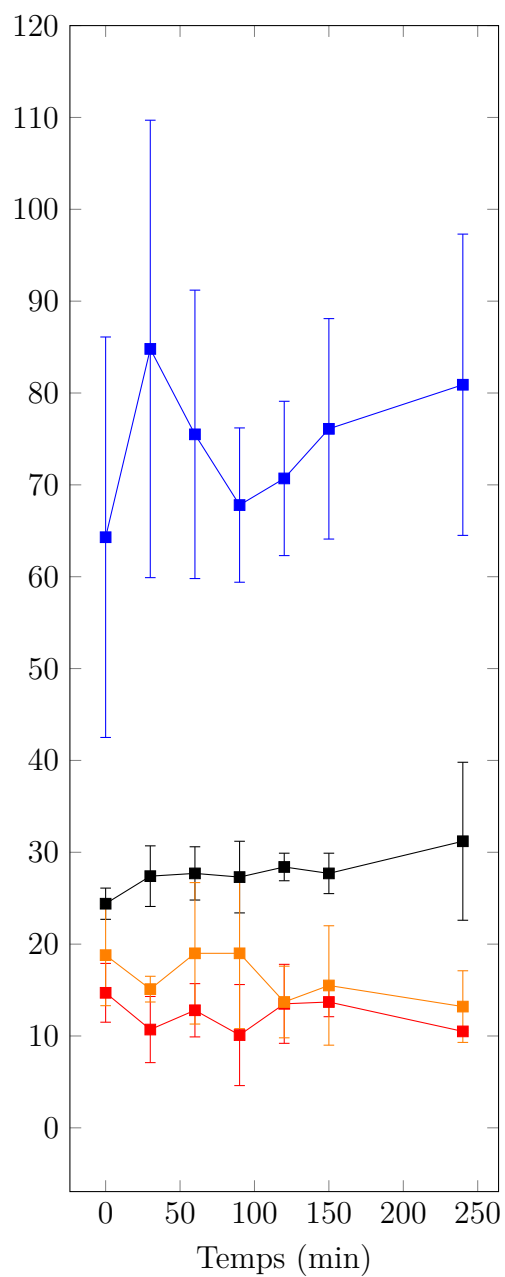


(b) Essai n° 2

FIGURE B.1 – Evolution du paramètre Sp en fonction du temps de cycle

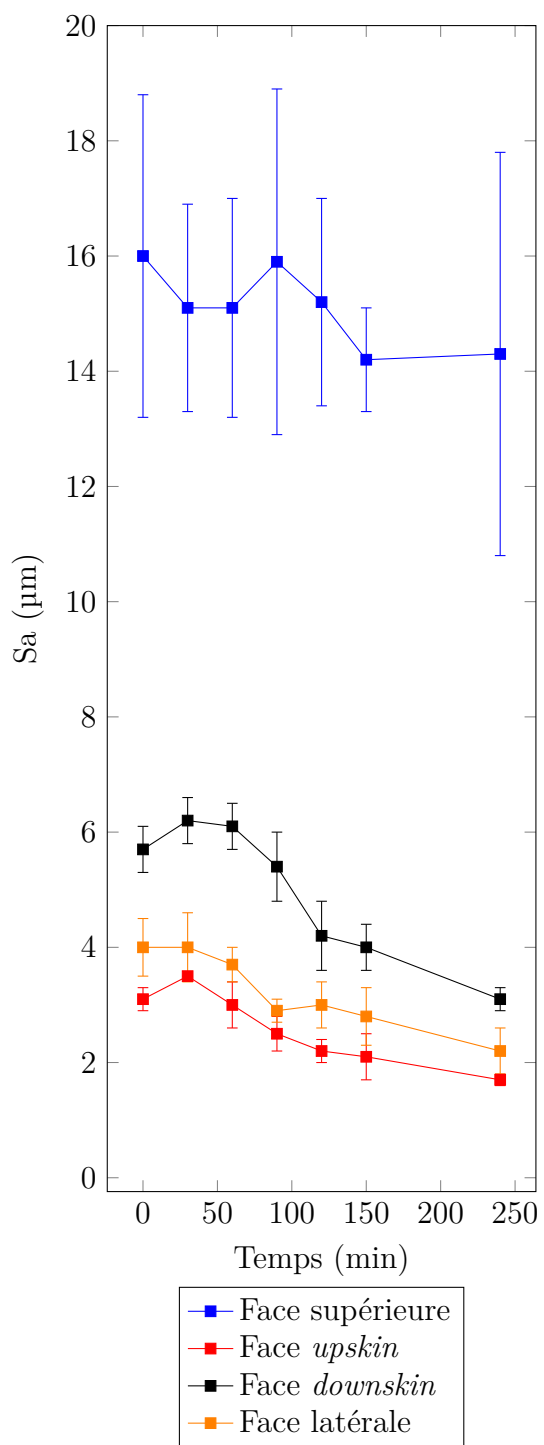


(a) Essai n° 1

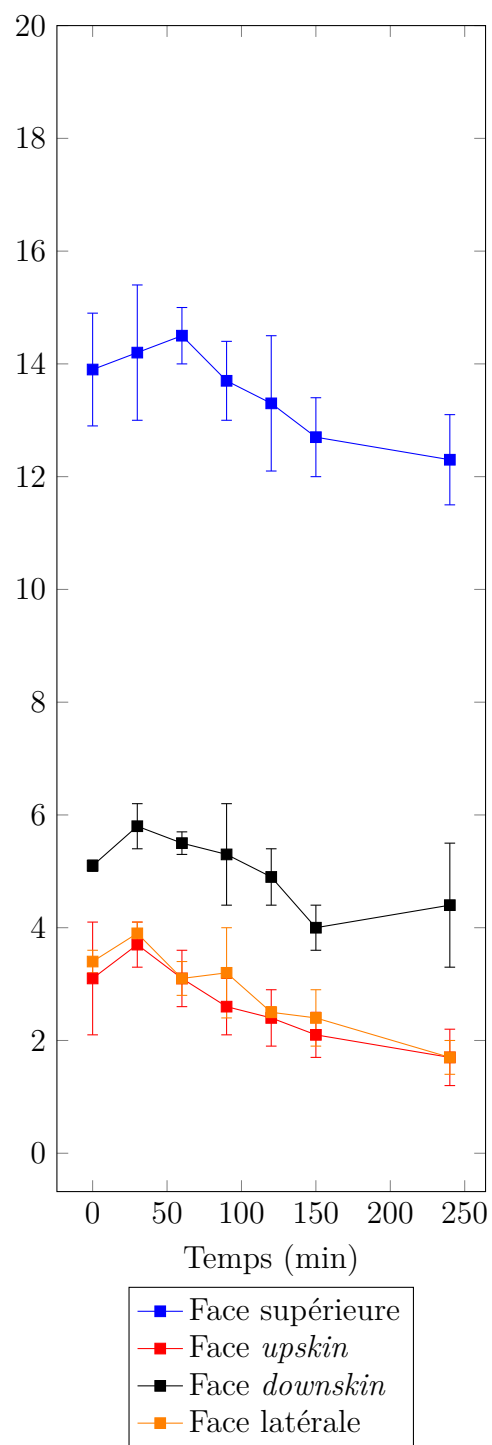


(b) Essai n° 2

FIGURE B.2 – Evolution du paramètre Sv en fonction du temps de cycle



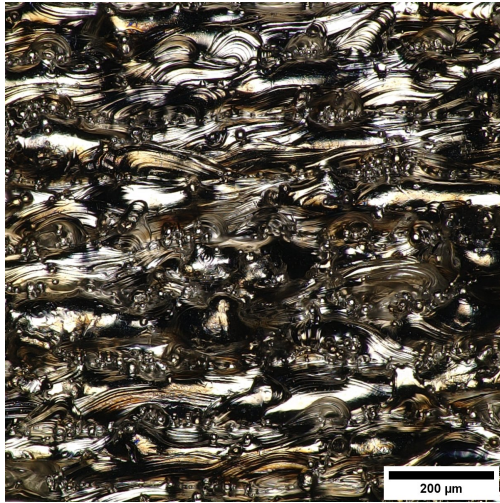
(a) Essai n° 1



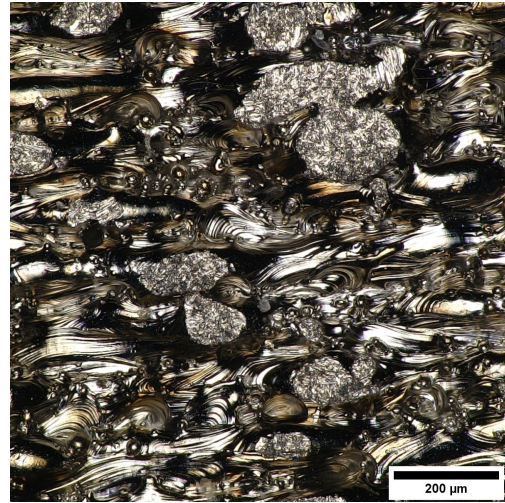
(b) Essai n° 2

FIGURE B.3 – Evolution du paramètre Sa en fonction du temps de cycle

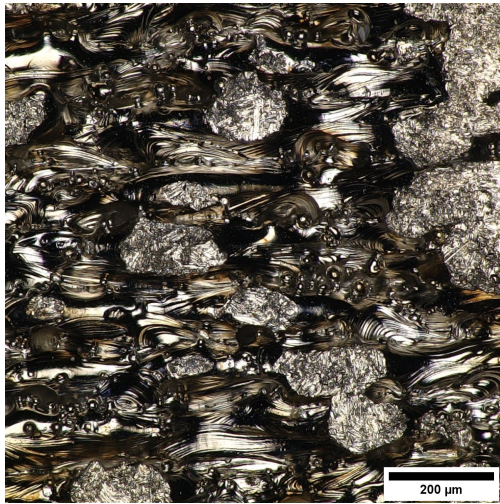
C | Evolution des surfaces



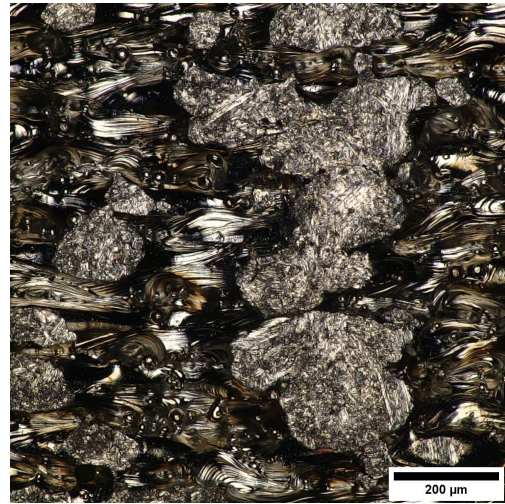
(a) Avant traitement



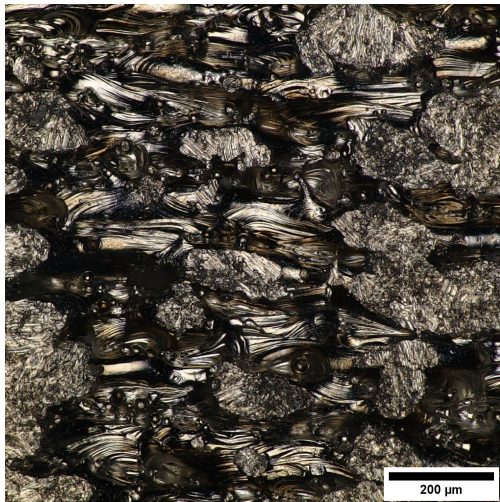
(b) Après 30 min



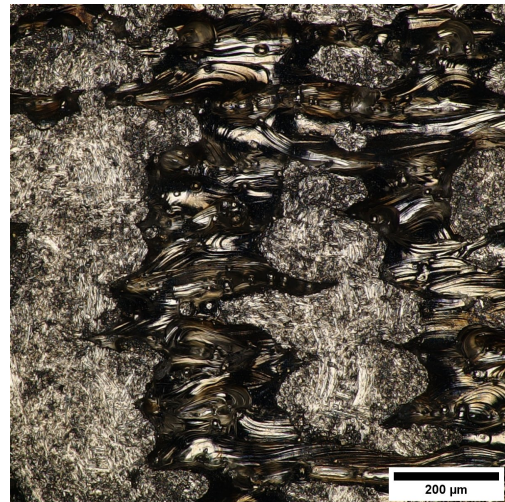
(c) Après 60 min



(d) Après 90 min

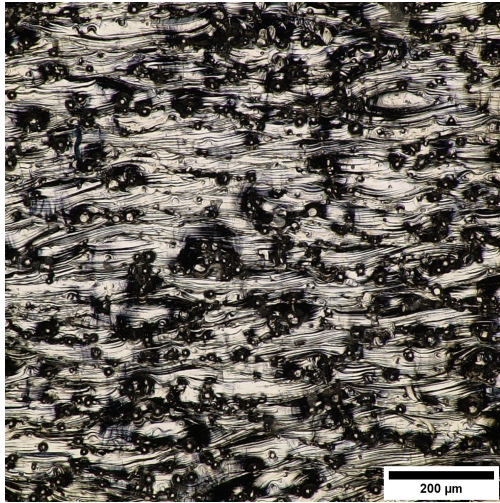


(e) Après 120 min

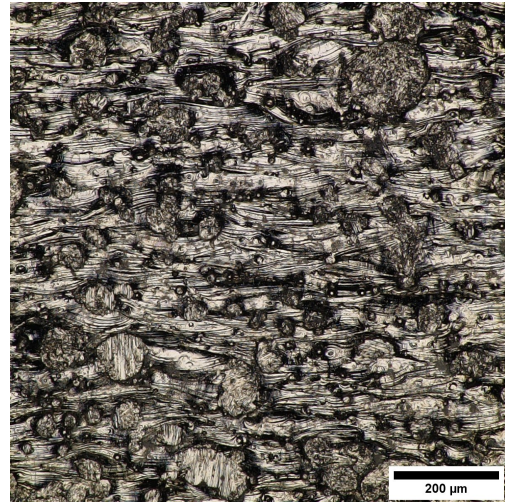


(f) Après 240 min

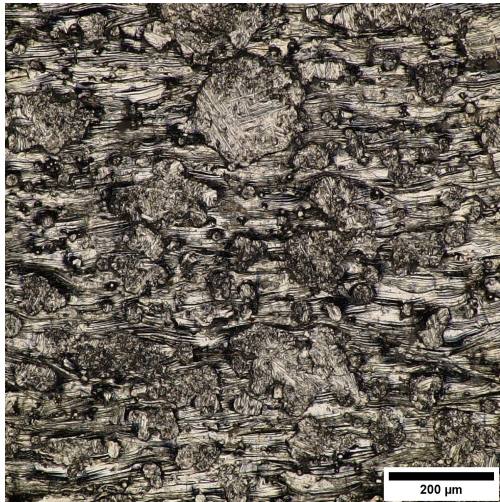
FIGURE C.1 – Evolution de la face supérieure



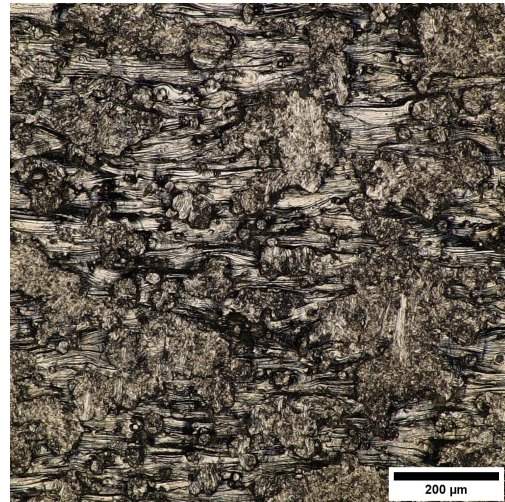
(a) Avant traitement



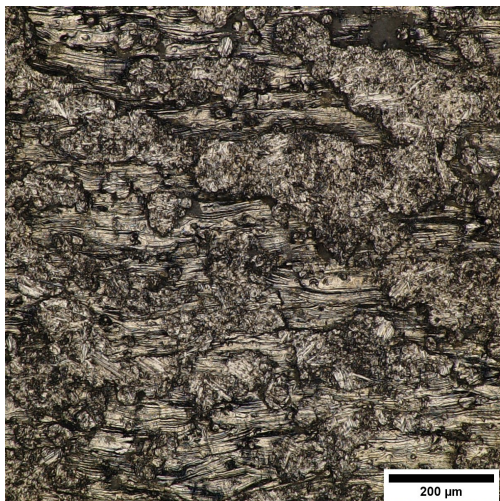
(b) Après 30 min



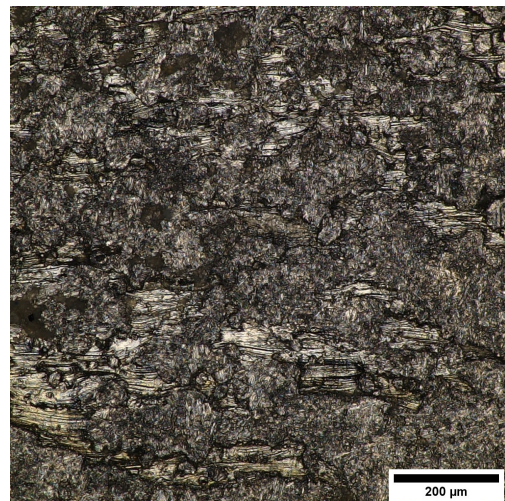
(c) Après 60 min



(d) Après 90 min

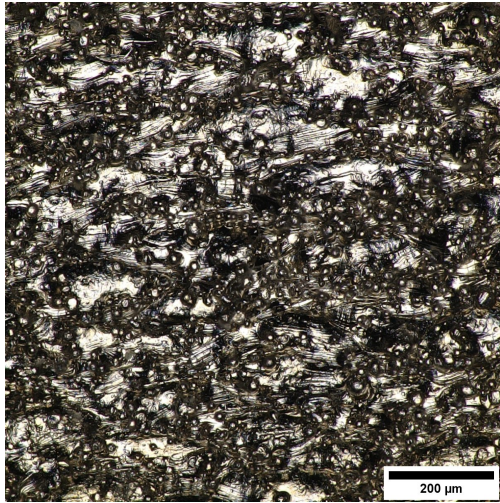


(e) Après 120 min

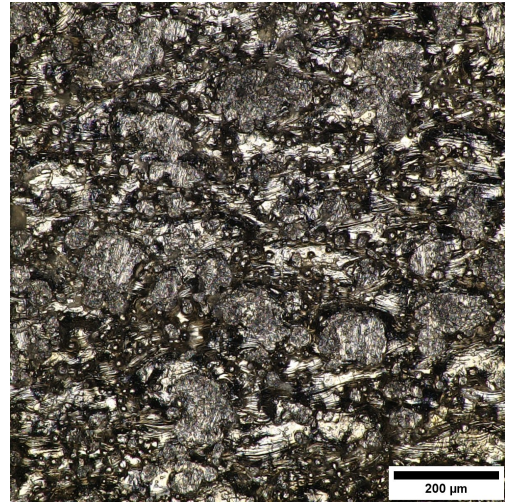


(f) Après 240 min

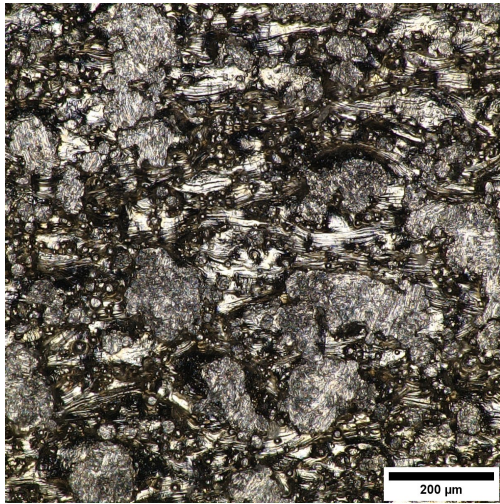
FIGURE C.2 – Evolution de la face *upsikin*



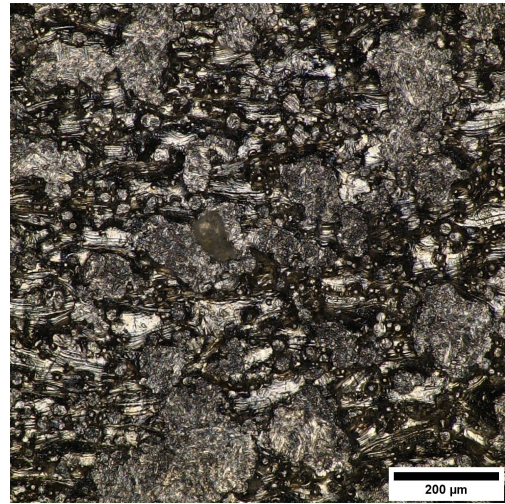
(a) Avant traitement



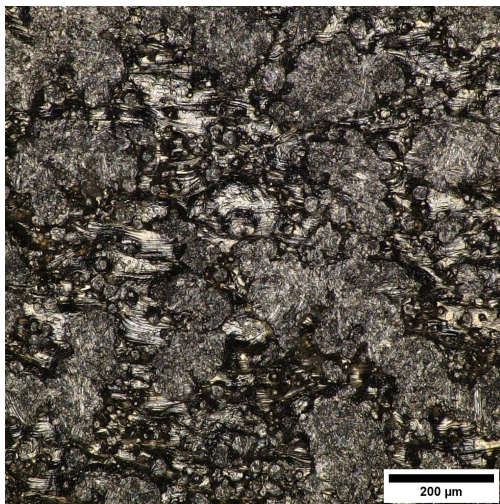
(b) Après 30 min



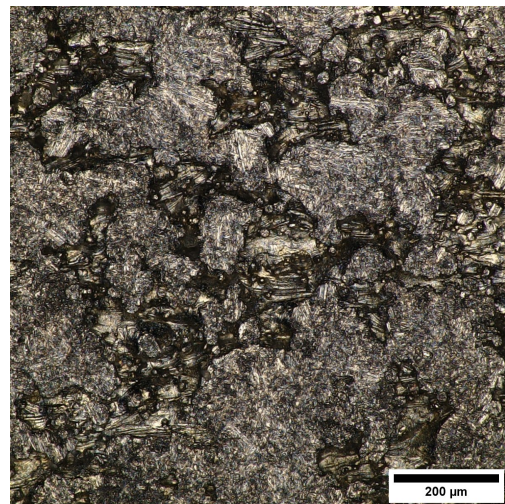
(c) Après 60 min



(d) Après 90 min

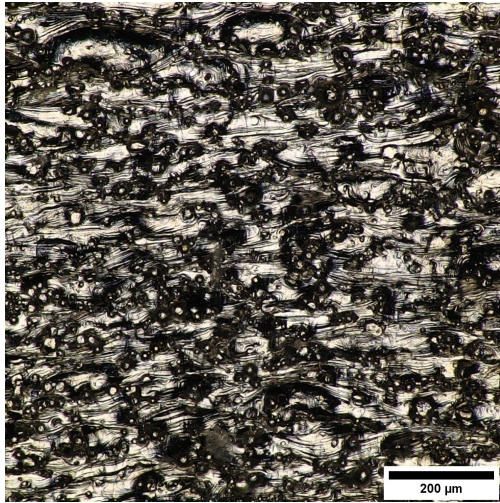


(e) Après 120 min

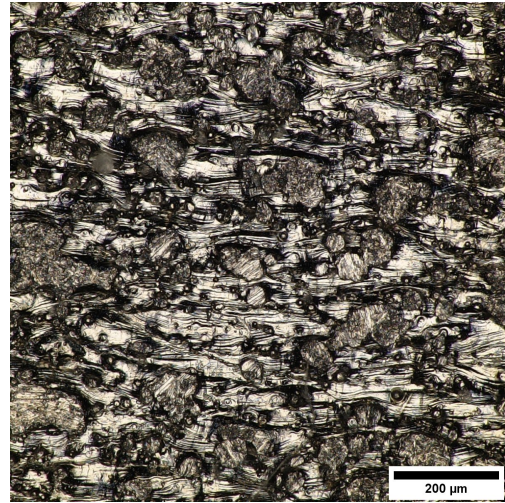


(f) Après 240 min

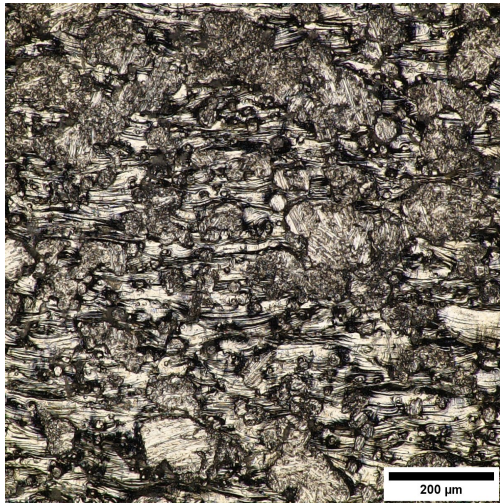
FIGURE C.3 – Evolution de la face *downskin*



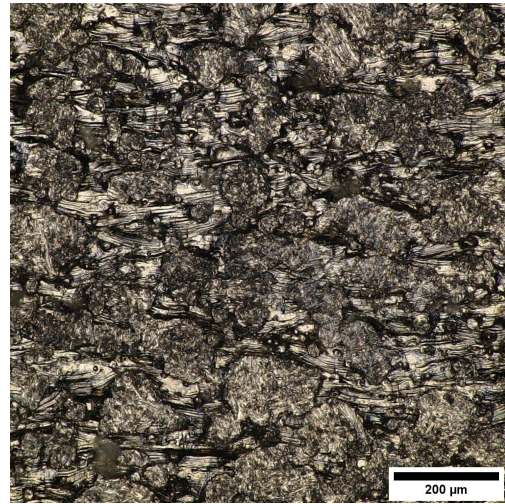
(a) Avant traitement



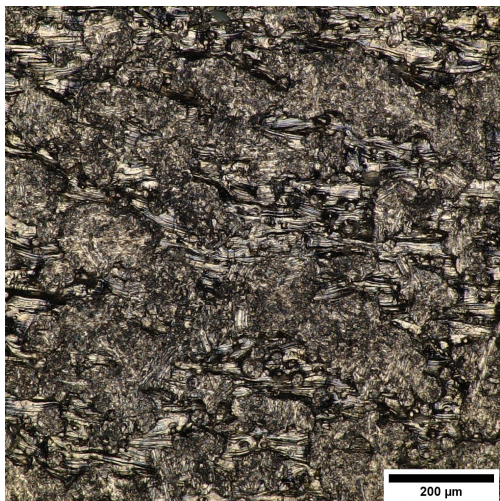
(b) Après 30 min



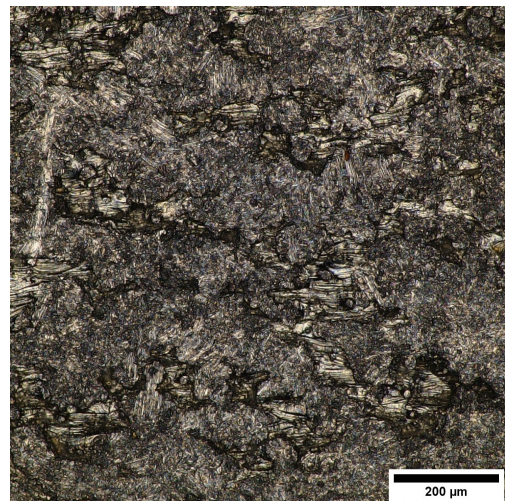
(c) Après 60 min



(d) Après 90 min



(e) Après 120 min



(f) Après 240 min

FIGURE C.4 – Evolution de la face latérale