

Chapitre 4 : Approche globale de la morphologie de l'interface

SOMMAIRE

CHAPITRE 4 : APPROCHE GLOBALE DE LA MORPHOLOGIE DE L'INTERFACE	129
PARTIE 1 : ETUDE TOPOGRAPHIQUE DE LA SURFACE AVANT PROJECTION.....	133
INTRODUCTION	135
1. DEFINITION DE LA SURFACE.....	135
1.1. MECANISMES DE DEFORMATION DE LA SURFACE.....	135
1.2. CARACTERISATION DE LA SURFACE DU SUBSTRAT.....	136
1.2.1. Détermination de la topographie et de ses propriétés	136
1.2.2. Détermination de la longueur développée	137
1.2.3. Détermination de la surface développée.....	138
2. ANALYSE PROFILOMETRIQUE DE LA SURFACE.....	139
2.1. TOPOGRAPHIE DE SURFACE PAR UNE ANALYSE 1D.....	139
2.1.1. Conditions de mesure de la rugosité.....	139
2.1.2. Paramètres de rugosité des substrats	140
2.2. TOPOGRAPHIE DE SURFACE PAR UNE ANALYSE 2D.....	140
2.2.1. Présentation des paramètres de rugosité.....	140
2.2.2. Paramètres de rugosité des substrats	141
3. ANALYSE STATISTIQUE ET MORPHOLOGIQUE DE SURFACE.....	143
3.1. FILTRAGE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE	143
3.2. DETERMINATION DE LA LONGUEUR CARACTERISTIQUE	144
3.2.1. Outils morphologiques.....	144
3.2.2. Longueur représentative du profil	145
3.3. PROPORTION DES VALLEES REMPLIES PAR LES PARTICULES.....	145
3.3.1. Méthode et hypothèses	145
3.3.2. Influence du diamètre de la particule	146
4. CARACTERISATION DIMENSIONNELLE DES VALLEES DE SURFACE.....	148
4.1. METHODE D'ANALYSE DES VALLEES DE SURFACE	148
4.1.1. Définition d'une vallée.....	148
4.1.2. Filtrage des vallées du profil	149
4.2. DIMENSIONS GEOMETRIQUES DES VALLEES	151
4.2.1. Détermination de l'amplitude des vallées	151
4.2.2. Détermination de la largeur des vallées	152
4.3. BILAN SUR LA MORPHOLOGIE DES VALLEES.....	153
CONCLUSION SUR L'ANALYSE TOPOGRAPHIQUE DE LA SURFACE.....	155
PARTIE 2 : ETUDE MORPHOLOGIQUE DE L'INTERFACE REVETEMENT-SUBSTRAT APRES PROJECTION.....	157
1. DEFINITION DE L'INTERFACE REVETEMENT-SUBSTRAT	159
1.1. IDENTIFICATION DU PROFIL DE L'INTERFACE PARTICULE-SUBSTRAT	159
1.2. DETERMINATION DE LA ZONE DE CONTACT A L'INTERFACE.....	159
1.2.1. Détermination de la zone de contact à l'échelle locale	160
1.2.2. Détermination de la zone de contact à l'échelle globale.....	160

1.3. DEFORMATIONS INDUITES PAR LE PROCEDE COLD SPRAY	161
1.3.1. Déformation de la particule	161
1.3.2. Déformation plastique du substrat	162
1.4. ETUDE DES PARAMETRES DE RUGOSITE DE L'INTERFACE	163
2. DEFORMATION DE L'INTERFACE PARTICULES-SUBSTRAT	164
2.1. INFLUENCE DE LA RUGOSITE DU SUBSTRAT	164
2.1.1. Amortissement énergétique	164
2.1.2. Ancrage mécanique	164
2.2. INFLUENCE DE L'ANGLE DE PROJECTION	165
2.2.1. Evolution de la rugosité de l'interface	165
2.2.2. Mécanisme d'ancrage sur substrat rugueux.....	166
2.2.3. Mécanisme d'ancrage sur substrat lisse	166
2.3. EFFET SUR LA CONSTRUCTION DU REVETEMENT	167
2.3.1. Vallées de petites dimensions	167
2.3.2. Vallées de très grandes dimensions	168
2.4. CONCLUSION SUR LES DEFORMATIONS DE L'INTERFACE	168
3. CARACTERISATION DIMENSIONNELLE DES VALLEES D'INTERFACE	169
3.1. DETERMINATION DE L'AMPLITUDE DES VALLEES	169
3.2. DETERMINATION DE LA LARGEUR DES VALLEES.....	170
3.3. BILAN SUR LA MORPHOLOGIE DES VALLEES.....	171
4. CORRELATION MORPHOLOGIQUE ENTRE LA SURFACE DU SUBSTRAT ET L'INTERFACE	173
CONCLUSION SUR LA MORPHOLOGIE DE L'INTERFACE	174
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	175

Partie 1 : Etude topographique de la surface avant projection

Introduction

La préparation de surface par sablage modifie, par déformation plastique, la topographie du substrat métallique. Une caractérisation des rugosités de surface est effectuée. Les objectifs sont multiples et doivent permettre de donner lieu à une meilleure compréhension des mécanismes d'adhésion entre les particules et le substrat. Cette étude des surfaces très aléatoires, obtenues après sablage, pourra alors s'étendre aux surfaces plus simples.

Dans la première partie du chapitre, la morphologie de surface après sablage et avant revêtement est analysée afin de comprendre comment les particules viennent se loger dans les rugosités de surface. Pour cela, une étude de la morphologie de surface est effectuée à l'aide d'outils adaptés reposant notamment sur des lois statistiques. Une caractérisation approfondie des rugosités de surface doit permettre d'établir une corrélation entre la morphologie de surface et l'adhérence du revêtement déposé par cold spray.

Dans la seconde partie du chapitre, la déformation induite par le procédé cold spray est étudiée. Une caractérisation de la nouvelle surface est alors envisagée afin d'en extraire les paramètres caractéristiques. L'objectif étant de lier l'état de surface et l'adhérence du revêtement, la morphologie de l'interface revêtement-substrat est analysée afin de qualifier la déformation plastique de la surface.

Dans l'intégralité du chapitre, les analyses morphologiques et dimensionnelles des profils s'effectuent de manière statistique avec la moyenne sur une série de dix profils. L'étude traite de l'impact de l'aluminium pur 1050 sur un substrat d'aluminium 2024-T3 plus dur. Cette étude est menée en collaboration avec le Centre de Morphologie Mathématique (Dominique Jeulin) et l'aide de Francesco Delloro (Centre des Matériaux).

1. Définition de la surface

1.1. Mécanismes de déformation de la surface

Caractérisés par une certaine plasticité (malléable et ductile), l'aluminium et ses alliages se déforment lorsque des particules abrasives sont projetées à sa surface. Ces particules déforment plastiquement la surface du substrat d'aluminium mais d'autres phénomènes se produisent au cours des multiples impacts. La déformation plastique du substrat se produit sur une couche relativement fine où un durcissement de la matière est induit (Figure 4-1a). Du cisaillement se développe lorsque des particules anguleuses percutent la surface. En effet, sous l'effet de l'énergie cinétique élevée, la pression exercée peut rompre le matériau et créer ainsi des micro-fissures (Figure 4-1b). La multiplicité des impacts sur une surface micro-fissurée provoque, dans certains cas, des arrachements de matière comme cela est illustré sur la Figure 4-1c.

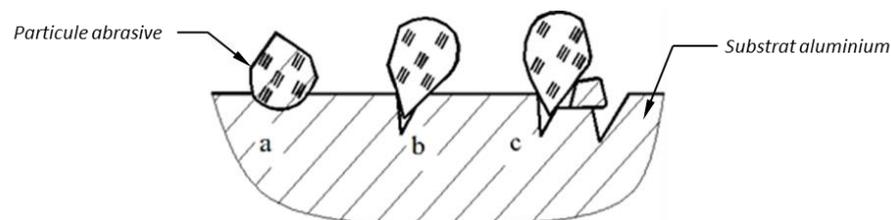


Figure 4-1 : Phénomènes de (a) déformation plastique, (b) micro-cisaillement et (c) micro-arrachement développés sous l'action d'impact de particules abrasives sur un substrat d'aluminium [SLA11].

Le substrat subit des déformations plastiques associées à des micro-fissurations et des micro-arrachements, ce qui engendre un état de surface très aléatoire et rugueux (Chapitre 1, §1.2.1). Cette rugosité

a d'ailleurs fait l'objet d'une étude visant à prédire les paramètres de surface à partir des paramètres de sablage du substrat [SLA11]. La distance de projection, l'angle d'incidence et le diamètre moyen des particules abrasives ont été pris en compte. A partir des mesures profilométriques, un modèle empirique reposant sur la méthode des moindres carrés a été établi. Afin de mesurer la validité du modèle, une comparaison entre les résultats obtenus et ceux issus de l'analyse profilométrique des substrats d'aluminium 2024-T3 sablés est entreprise comme cela est démontré sur la Figure 4-2. Si les valeurs de Ra et de Rq sont très proches entre le modèle et l'expérimental, le paramètre de rugosité Rz est sensiblement différent. Les valeurs sont sous-estimées d'un rapport deux par le calcul et peuvent s'expliquer, notamment, par la non prise en considération des propriétés mécaniques intrinsèques des substrats d'aluminium qui varient suivant les éléments d'alliage le composant. En effet, les travaux de Slatineanu ne mentionnent pas le type de substrat utilisé pour l'établissement du modèle.

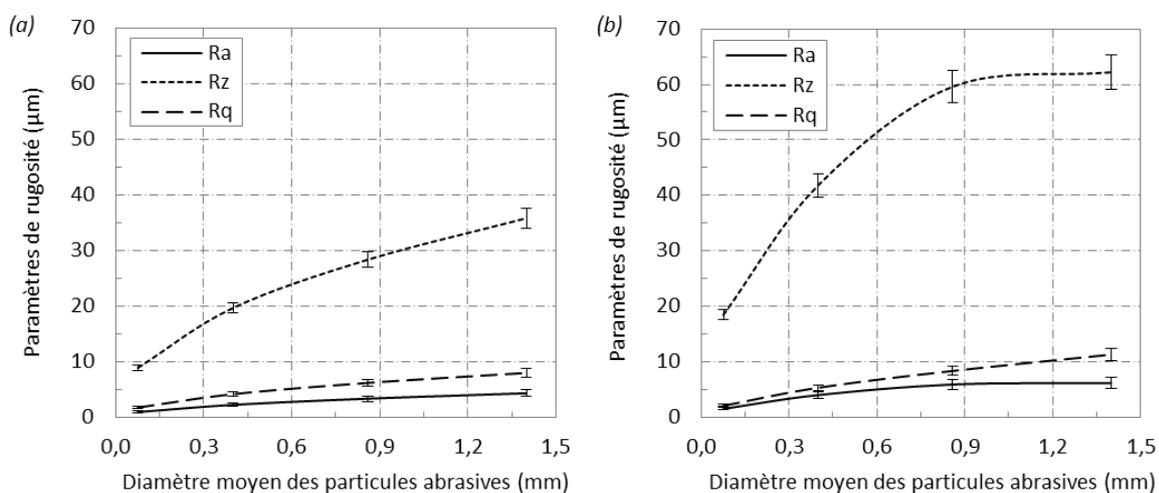


Figure 4-2 : Influence de la granulométrie moyenne des particules abrasives sur les paramètres de rugosité Ra, Rq et Rz dont les valeurs sont issues (a) du modèle empirique de Slatineanu [SLA11] et (b) de l'analyse profilométrique.

1.2. Caractérisation de la surface du substrat

1.2.1. Détermination de la topographie et de ses propriétés

L'analyse de surface des différents substrats d'aluminium 2024-T3 sablés permet d'obtenir un profil de la surface après qu'elle ait été modifiée mécaniquement. La détermination de profils 1D et 2D est réalisée par profilométrie optique avec un pas de résolution de 1 µm (Chapitre 2, §4.3). Les particules projetées par cold spray rencontrent une surface accidentée où les rugosités sont nombreuses. De multiples cratères sont identifiés et sont caractéristiques de la morphologie des substrats sablés (Figure 4-3). Les lignes représentent les frontières des cratères de surface et permettent d'en identifier la morphologie.

Les rugosités de surface sont amenées à être en contact avec les particules projetées par cold spray. L'ancrage mécanique des particules est donc influencé par les dimensions de ces rugosités. Par l'augmentation de l'amplitude de la rugosité, on accroît la profondeur de pénétration h_p des particules [RIC05].

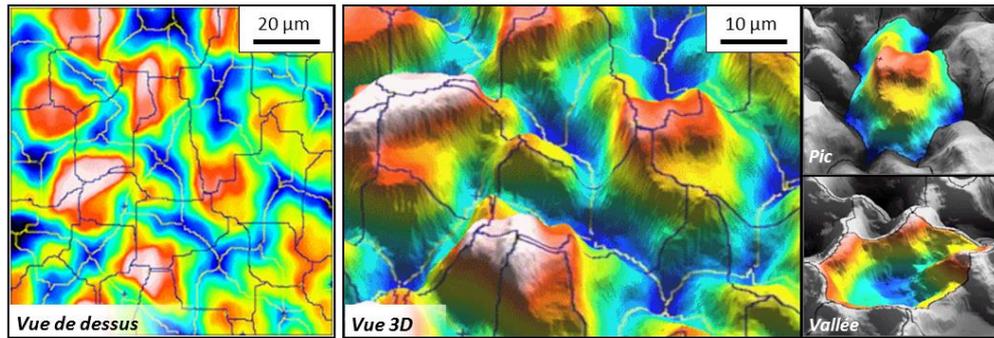


Figure 4-3 : Cartographies des cratères présents sur la surface rugueuse d'un substrat d'aluminium 2024-T3 sablé, obtenue suite à l'analyse profilométrique de surface.

1.2.2. Détermination de la longueur développée

Evaluer l'influence de la préparation de surface sur la morphologie du substrat passe par une identification de la nouvelle surface, c'est-à-dire après sablage. Les rugosités générées augmentent incontestablement l'aire de la surface apparente, associée à une surface de contact (Chapitre 1, §1.2.1) [EBN11]. Quantifier cette longueur du profil après différentes préparations de surface s'avère être une première approche dans la compréhension des mécanismes d'adhérence sur des surfaces rugueuses. La Figure 4-4 illustre les profils de surfaces rugueuses que l'on peut rencontrer après différentes modifications de surface du substrat. Dans chacun des cas, le profil est discrétisé pour l'assimiler à une succession de segments de droite dont la valeur est déterminée par la somme des longueurs élémentaires L_i .

La longueur du profil développé est comparée à la longueur du profil projeté. Le rapport entre ces deux longueurs est noté R_{pp} . En se rapportant à l'état brut, c'est-à-dire sans rugosité, le profil mesuré est très irrégulier et présente des hauteurs de pics et de vallées significatives qui augmentent considérablement sa longueur (Tableau 4-1).

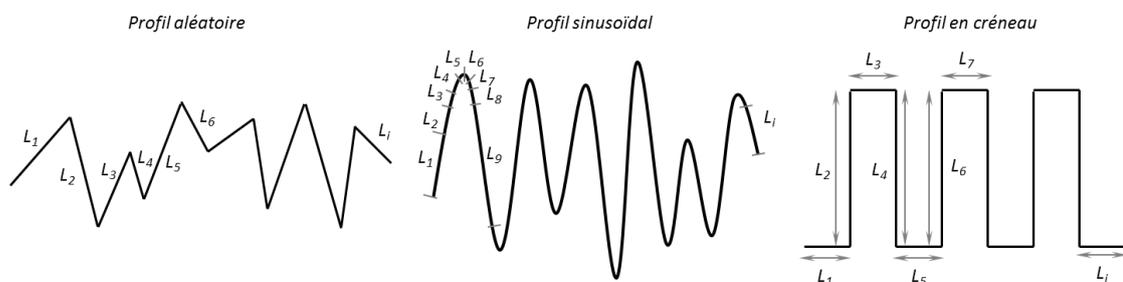


Figure 4-4 : Schéma de profils 1D d'une surface rugueuse et méthode de discrétisation du profil.

Tableau 4-1 : Longueur du profil 1D des substrats d'aluminium 2024-T3 après sablage, déterminée pour une longueur d'évaluation de 40 mm.

Type de préparation de surface	Surface plane	Substrat brut	Sablage fin (62 µm)	Sablage intermédiaire (300 µm)	Sablage grossier (700 µm)
Longueur projetée (mm)	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00
Longueur développée (mm)	40,01	40,04	42,57	56,12	55,21
R_{pp}	1,00	1,00	1,06	1,40	1,38

Le sablage avec des particules abrasives assez grandes accroît sensiblement la longueur du profil puisqu'une augmentation d'environ 40% est mesurée dans le cas des sablages intermédiaire et grossier. Une granulométrie fine de corindon ne permet pas de modifier significativement la longueur du profil. Des

rugosités de petites dimensions sont générées. De plus, une augmentation de la taille du corindon, au-delà du sablage intermédiaire, n'est plus synonyme d'accroissement de la longueur du profil. Une légère diminution de la longueur du profil est mesurée et s'apparente à un phénomène de lissage de la surface. Cette tendance est vérifiée pour un sablage très grossier utilisant des particules d'alumine d'environ 1400 µm de diamètre moyen. Le sablage très grossier entraîne une baisse du R_{pp} égal à 1,34. Les rugosités de surface sont majoritairement gommées. La longueur développée du profil semble ainsi limitée par la granulométrie des particules abrasives. La représentativité de la morphologie du substrat peut être affinée par une analyse 3D de sa surface.

1.2.3. Détermination de la surface développée

Une zone d'analyse de surface de 10 x 10 mm², avec une résolution de mesure de 1 µm est choisie. Cette surface est appelée « aire projetée ». La surface réelle du substrat est nommée « aire développée ». Le rapport entre la surface projetée et l'aire développée est noté R_{ps} . Ce rapport atteint 2,50, son maximum, pour un sablage de type intermédiaire. Comme pour l'analyse 1D, une atténuation est mesurée au-delà d'une certaine taille de corindon (Tableau 4-2). Les techniques 1D et 2D donnent des résultats qui vont dans le même sens : une augmentation de l'aire développée est mesurée après sablage puis une diminution est observée au-delà du sablage intermédiaire. La Figure 4-5 met en évidence les résultats obtenus par l'analyse 1D et 2D des surfaces rugueuses. A priori, aucune relation directe ne peut être établit entre la longueur et l'aire développées.

Tableau 4-2 : Aire de la surface des substrats d'aluminium 2024-T3 après sablage, déterminée pour une surface de 100 mm².

Type de préparation de surface	Surface plane (cas idéal)	Substrat brut (laminé)	Sablage fin	Sablage intermédiaire	Sablage grossier
Aire projetée (mm ²)	100	100	100	100	100
Aire développée (mm ²)	100	101	118	250	235
R_{ps}	1,00	1,013	1,178	3,501	3,351

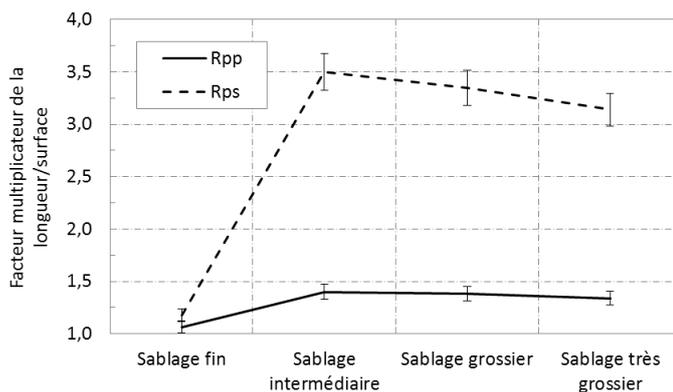


Figure 4-5 : Facteur multiplicateur des longueurs (R_{pp}) et des aires (R_{ps}) développées des substrats d'aluminium 2024-T3 sablés en fonction de la granulométrie du corindon.

L'étude des surfaces consiste à évaluer le rôle majeur de cette notion de longueur et d'aire développées vis-à-vis de l'adhésion du revêtement. Si un grand nombre de paramètres et de coefficients existent pour qualifier cette rugosité de surface, les plus pertinents sont présentés dans la suite de l'étude (§2). La rugosité de surface des échantillons sablés y est mesurée par profilométrie optique.

2. Analyse profilométrique de la surface

Cette partie se concentre sur les paramètres existants pour caractériser un profil (1D) et une surface (2D). Les rugosités de surface, comme les pics et les vallées, sont quantifiées et caractérisées par une aire ou un volume, respectivement pour un profil et une surface. La technique d'analyse par profilométrie demeure un moyen efficace mais néanmoins classique de caractérisation des surfaces rugueuses.

2.1. Topographie de surface par une analyse 1D

Une surface peut se caractériser par des coefficients mesurés à partir de sa morphologie. Des outils permettant de caractériser les rugosités de surface sont utilisés par les industriels notamment pour différencier deux surfaces ou accepter un état de surface sur une pièce par exemple. Les analyses en profilométrie 1D et 2D possèdent toutes les deux des paramètres (ou coefficients) qui leurs sont propres. Elles sont utilisées, dans cette partie, pour une première caractérisation des surfaces sablées. Cette méthode a été, par ailleurs, retenue par Gan [GAN14] dans son approche statistique des surfaces rugueuses.

2.1.1. Conditions de mesure de la rugosité

La longueur minimum représentative d'une surface est déterminante dans l'identification de ses coefficients. Cette longueur doit correspondre au mieux au profil d'état de surface. Dans le cas contraire, les paramètres de rugosité mesurés seront soit sous-estimés, soit surestimés. Dans le cas où cette longueur n'est pas explicitement spécifiée, il faut la choisir, à partir du Tableau 4-3, en fonction du type de profil de rugosité et de l'estimation du paramètre Ra et Rz dont les définitions sont données par l'équation 4.1 et 4.2, pour une longueur de profil l .

$$(Eq. 4.1) \quad Ra = \frac{1}{L} \int_0^L z \cdot dz$$

$$Rz = \frac{1}{s} \sum_0^s Rt_i \quad (Eq. 4.2)$$

Le paramètre Ra représente la moyenne arithmétique des altitudes z du profil. Rz représente la distance moyenne entre les z maxima et minima sur une longueur d'échantillonnage s , et est défini par rapport aux valeurs de $Rt = z_{\max} - z_{\min}$. Enfin, le paramètre RSm permet de caractériser la largeur des motifs d'une surface périodique ou pseudo-périodique. Aucun sens ne peut lui être attribué dans le cas d'une surface aléatoire. Il n'est donc pas pris en considération dans l'étude.

Tableau 4-3 : Choix de la longueur de base en fonction du profil de rugosité 1D non périodique [MUR09].

Paramètre à estimer	Ra (μm)	Rz (μm)	RSm (mm)	Longueur de base (mm)	Longueur d'évaluation (mm)
	$0 < Ra < 0,02$	$0 < Rz < 0,1$	$0,013 < RSm < 0,04$	0,08	0,4
	$0,02 < Ra < 0,1$	$0,1 < Rz < 0,5$	$0,04 < RSm < 0,13$	0,25	1,25
Estimation	$0,1 < Ra < 2$	$0,5 < Rz < 10$	$0,13 < RSm < 0,4$	0,8	4
	$2 < Ra < 10$	$10 < Rz < 50$	$0,013 < RSm < 1,3$	2,5	12,5
	$10 < Ra < 80$	$50 < Rz < 200$	$1,3 < RSm < 4$	8	40

2.1.2. Paramètres de rugosité des substrats

Si la granulométrie du corindon n'influe pas significativement sur l'état de contraintes résiduelles dans le matériau (Chapitre 2, §3.1.4), elle modifie considérablement la morphologie de surface du substrat. A travers les profils réalisés sur des échantillons d'aluminium 2024-T3, une analyse de la morphologie de surface est entreprise. Une longueur d'évaluation de 40 mm est choisie, pour une représentativité accrue de la surface. La résolution d'analyse est, quant à elle, fixée à 1 μm . Les paramètres de rugosité mesurés par profilométrie 2D sont nombreux et résumés dans le Tableau 4-4, en fonction de l'état de surface du substrat d'aluminium 2024-T3. Des substrats à l'état brut de laminage et sablés sont analysés. Entre un substrat sablé finement et un autre sablé grossièrement, l'amplitude R_z des rugosités est différente. Dans le premier cas, elle avoisine 15 μm alors que, dans le second cas, elle atteint 60 μm .

Tableau 4-4 : Paramètres de rugosité d'un profil 1D pour des substrats d'aluminium 2024-T3 en fonction de la préparation de surface réalisée.

Type de préparation	Aucune	Sablage		
Spécificité	Laminé	Fin	Intermédiaire	Grossier
R_a (μm)	$0,24 \pm 0,03$	$1,53 \pm 0,05$	$4,01 \pm 0,14$	$5,91 \pm 0,26$
R_z (μm)	$1,72 \pm 0,11$	$18,48 \pm 1,28$	$41,84 \pm 2,80$	$59,60 \pm 6,79$
R_t (μm)	$3,42 \pm 0,32$	$26,00 \pm 3,16$	$52,60 \pm 8,76$	$74,40 \pm 10,14$

2.2. Topographie de surface par une analyse 2D

2.2.1. Présentation des paramètres de rugosité

L'échantillonnage de la topographie d'une surface s'effectue par l'acquisition d'un certain nombre de points équidistants d'un pas régulier en X et en Y. Le traitement débute par le redressement de la surface palpée. Cette opération nécessite la détermination du plan des moindres carrés. Cette méthode vise à minimiser les variations par rapport à chacun des coefficients du plan moyen.

Par analogie à la terminologie utilisée en profilométrie 1D, les principales composantes qui constituent le paramètre mesuré sur une surface, sont la forme, l'ondulation et la rugosité. La principale différence est la prise en compte de la direction de ces composantes. En effet, la direction de la forme, de l'ondulation et de la rugosité peut être différente. L'orientation des composantes topographiques d'une surface est mise en évidence par l'analyse du spectre de Fourier. La seconde étape du traitement est le filtrage, qui consiste à séparer les différentes composantes de la surface. Le principe est de passer de la surface mesurée à la surface nettoyée par l'utilisation de filtres. Ces derniers permettent notamment d'éliminer le bruit de fond de la surface réelle et de séparer les composantes de faible échelle de la surface primaire. À ce jour, les paramètres 2D ne sont pas normalisés. Quelques uns sont présentés dans le Tableau 4-5 et sont issus de la norme expérimentale française XP E 05-030-1. S'ils permettent de caractériser la surface analysée en considérant les rugosités mesurées, ils ne renseignent pas véritablement sur les motifs de surface. En comparant ces paramètres de surface pour différentes préparations de surface de l'échantillon, la micro-géométrie peut être analysée.

Tableau 4-5 : Principaux paramètres d'états de surface 2D [MUR09].

Intitulé	Définition	Symbole
<u>Paramètres de hauteur</u>		
Ecart moyen arithmétique	Moyenne arithmétique des hauteurs	Sa
Amplitude maximale de la surface	Somme de Sp et Sv	Sz
<u>Paramètres latéraux et hybrides</u>		
Ratio de la surface développée	Rapport entre l'aire développée et l'aire de base	Sdr
<u>Fonctions et paramètres associés</u>		
Volume de vide des vallées	Volume des vallées	Vvv
Volume de matière des pics	Volume des pics	Vmp

2.2.2. Paramètres de rugosité des substrats

La topographie des surfaces pour des substrats d'aluminium 2024-T3 sablés montre les rugosités présentes (Figure 4-6). En fonction de la granulométrie des particules abrasives projetées, la morphologie est différente puisque, par exemple, la profondeur et le volume des pics de surface varient fortement.

Les paramètres de rugosité, proposés par la bibliographie [MUR09], permettent de caractériser ces rugosités. Les paramètres de hauteur et de volume / surface pour chacun des substrats analysés sont présentés dans le Tableau 4-6. Comme pour l'analyse 1D, les paramètres existants permettent de comparer les surfaces entre elles. Pour expliquer la meilleure adhérence des revêtements élaborés sur des surfaces rugueuses (Chapitre 6, §3.2), des paramètres de surface doivent être définis. Si les paramètres classiques modifient la topographie de surface, donc la capacité des particules à pénétrer dans le substrat, les mécanismes d'adhésion ne sont pas identifiés. De plus, une même valeur de paramètre Ra peut s'associer à deux surfaces morphologiquement différentes. Un paramètre inhérent à la surface doit alors être déterminé.

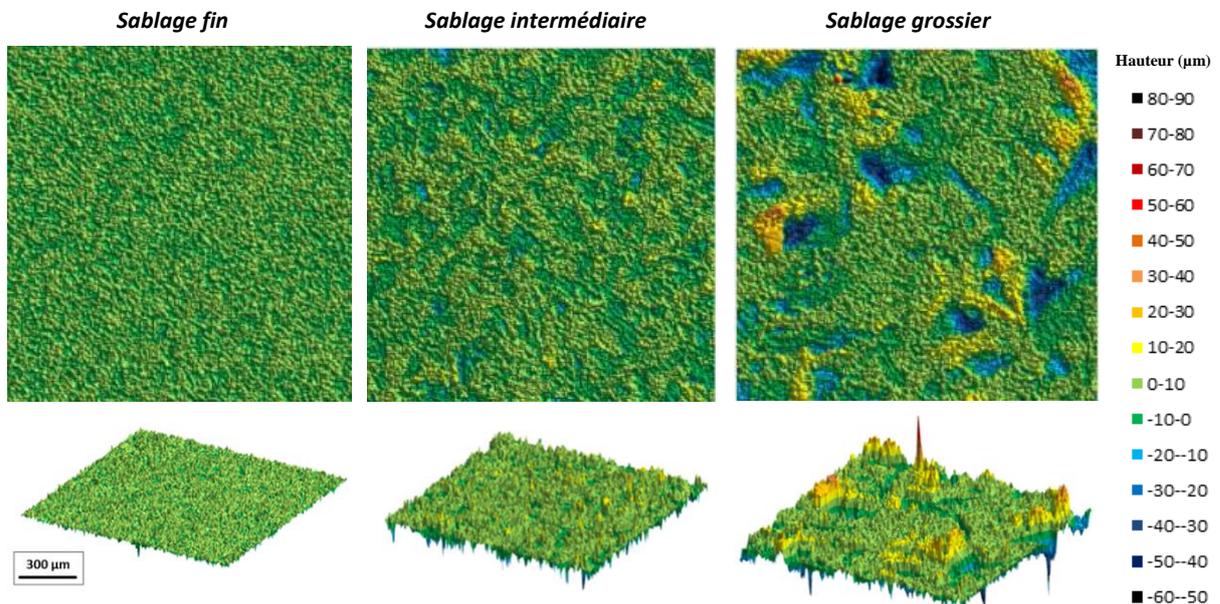


Figure 4-6 : Topographies de surface des substrats d'aluminium 2024-T3 après une préparation de surface par sablage.

La notion d'aire développée peut être un facteur caractérisant véritablement la surface. L'analyse par la profilométrie 2D de la surface permet d'accéder à cette aire développée, celle issue de l'opération de sablage. Une comparaison entre les différentes préparations de surface est réalisée en considérant la surface initialement plane. La valeur de Sdr donne directement le ratio entre l'aire développée et la surface initiale

(Chapitre 4, Partie 1 §1.2.3). Dans le Tableau 4-6, le volume des rugosités croît avec l'augmentation de la granulométrie du corindon. Néanmoins, ce volume grandissant ne permet pas d'augmenter l'aire développée, mais seulement d'avoir des cratères plus gros et moins nombreux. Une étude, réalisée en parallèle, a montré qu'en utilisant une granulométrie de corindon plus grossière (1400 μm de diamètre moyen), les paramètres de rugosité ainsi que la surface développée étaient davantage réduits. Cette conclusion a, par ailleurs, été mise en évidence par les travaux de Poorna [POO09] sur des substrats d'acier inoxydable.

Tableau 4-6 : Paramètres de rugosité 2D de surface pour des substrats d'aluminium 2024-T3 en fonction du sablage réalisé.

Type	Brut	Sablage		
<i>Spécificité</i>	-	<i>Fin</i>	<i>Intermédiaire</i>	<i>Grossier</i>
<i>Sa (μm)</i>	0,29	1,70	4,31	6,36
<i>Sz (μm)</i>	3,21	91,4	196	207
<i>Sdr</i>	1,002	1,178	3,501	3,351
<i>Vvv (ml.m^{-2})</i>	0,001	0,371	0,870	1,54
<i>Vmp (ml.m^{-2})</i>	0,001	0,103	0,241	0,533

3. Analyse statistique et morphologique de surface

3.1. Filtrage morphologique de la surface

Inscrites dans la théorie de la morphologie mathématique, les opérations morphologiques sont des filtres non linéaires qui s'appliquent, notamment, aux images binaires et en niveau de gris [JEU82] [JEU87-1] [JEU87-2]. Le traitement de ces dernières fournit ainsi des renseignements multiples sur sa morphologie. Les filtres permettent de déterminer les particularités de l'image analysée en lien avec une question bien définie. Par exemple, la reconstruction numérique d'une surface aléatoire par l'analyse morphologique permet d'appréhender les propriétés d'une surface complexe [JEU97]. Un élément structurant, appartenant à l'image, joue le rôle de sonde. Il se déplace en chaque point de l'image binaire où sa relation avec l'image est étudiée. Cet élément structurant se définit par un carré, constitué de l'origine et des huit points les plus proches. Telle est la définition du voisinage de l'élément structurant utilisé. Composée uniquement d'éléments blancs et noirs (0 ou 1), l'image est analysée suivant deux configurations : le voisinage binaire de l'élément structurant est de même nature (1 ou 0 uniquement), ou bien un ou plusieurs de ses éléments est différent de lui (1 et 0). Plusieurs opérations morphologiques de base existent [KUM06] [NAJ08-1] [NAJ08-2] :

- *Les opérations primaires* : la dilatation et l'érosion. L'érosion et la dilatation utilisent une opération logique entre tous les pixels d'une zone définie. Pour l'érosion, il faut faire un « ET » entre les pixels. Cette opération a pour but de retourner un 1 seulement si tous les pixels contenus dans la zone sont à 1 sinon elle renvoie un 0. Le résultat affichera donc du blanc si et seulement si la surface de la zone est blanche sur l'image d'origine. Les parties blanches de l'image sont ainsi érodées. Pour l'opération de dilatation, un « OU » entre les pixels est réalisé. Si plusieurs pixels contenus dans le masque valent 1, alors le pixel de sortie vaut 1. Les parties blanches sont donc étirées et sont plus nombreuses. Bien entendu, il est possible d'appliquer ces opérations aux parties noires à condition d'utiliser un « NON OU » pour l'érosion et un « NON ET » pour la dilatation.
- *Les opérations secondaires* : l'ouverture et la fermeture, sont la composition d'une dilatation morphologique avec l'érosion. Considérons un élément structurant, associé à un disque, qui parcourt la ligne (noire), ce dernier représente l'objet et le reste de l'image comme illustré sur la Figure 4-7. L'ouverture d'une ligne par l'élément structurant est l'ensemble des points recouverts lors du déplacement du disque à l'intérieur de la figure. Une propriété similaire vaut par dualité pour la fermeture si ce n'est que l'élément structurant parcourt le complémentaire de la figure. Le disque se déplace alors à l'extérieur de la ligne. La fermeture est la composition d'une dilatation suivie d'une érosion.

L'objectif est d'appliquer le filtrage morphologique sur les surfaces des substrats sablés afin de les caractériser d'une manière originale. L'étude est réalisée sur un profil extrait de la surface rugueuse.

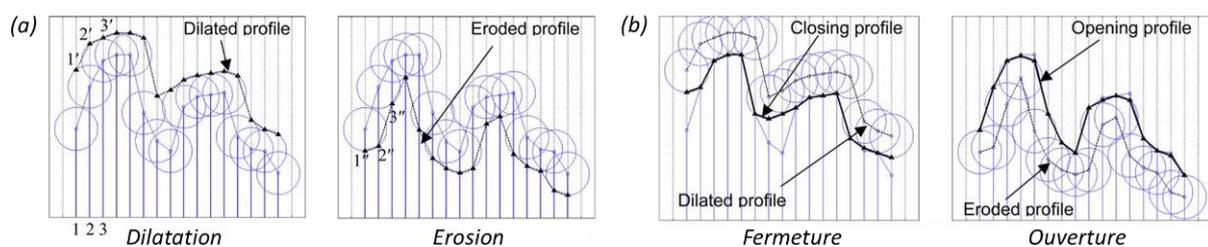


Figure 4-7 : Principales opérations morphologiques (a) opérations primaires : dilatation et érosion et (b) opérations secondaires : fermeture et ouverture [KUM06].

3.2. Détermination de la longueur caractéristique

La réalisation des opérations morphologiques sur les profils rugueux implique d'estimer la représentativité du profil analysé. La détermination de la longueur caractéristique du profil permet de valider les caractéristiques morphologiques établies après l'analyse, et ce quelle que soit la zone du profil considérée [GAG85] [JEU13].

3.2.1. Outils morphologiques

La fonction autocovariance $R(\tau)$ est un moyen de représenter les variations spatiales d'une surface (Eq. 4.3). Même si de nombreux renseignements spatiaux peuvent être extraits de cette fonction, seule une partie l'est ici. Elle mesure la covariance entre une variable et cette même variable à des positions différentes, pour un pas de mesure τ et une longueur d'échantillon L (Figure 4-8) :

$$R(\tau) = \lim_{L \rightarrow \infty} \int_0^L z(x) * z(x + \tau) \cdot dx \quad (\text{Eq. 4.3})$$

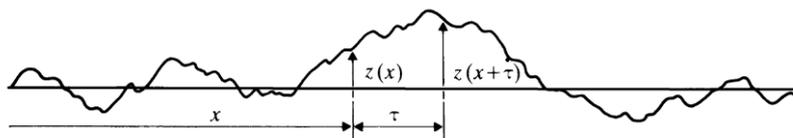


Figure 4-8 : Construction de la fonction d'autocovariance d'un profil aléatoire.

Des renseignements sont ainsi fournis sur la variabilité de la série. L'analyse de profils 2D a été étudiée précisément par Matern [MAT60]. La fonction autocorrélation ($\rho(\tau)$) est définie comme la fonction autocovariance normalisée par la variance σ^2 du profil de l'échantillon. La Figure 4-9 montre dans quelle mesure la fonction autocorrélation établit une distinction entre différents profils. Cette forme simplifiée a une longueur de corrélation $\rho(\tau) = 0,1$ quand $\tau = 2,3 \beta^*$, où $1/\beta^*$ est le taux de décroissance de la fonction à l'origine.

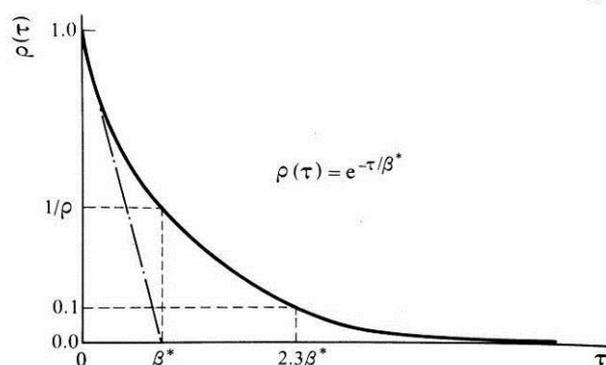


Figure 4-9 : Fonction modèle exponentielle d'autocorrélation d'un profil aléatoire [THO83].

En déterminant l'intersection de la courbe d'autocorrélation avec son palier, définie par le traçage de la tangente à l'origine, la longueur caractéristique L_c du profil est identifiée. Néanmoins, en utilisant la fonction de corrélation pour étudier les changements dans une topographie donnée, la plupart de ces changements sont dissimulés par la moyenne statistique. Des variations sont notables entre les différentes topographies du profil. Les fluctuations sont multiples et dues à la méthode statistique elle-même.

3.2.2. Longueur représentative du profil

La longueur caractéristique L_c du profil peut servir à définir la longueur représentative des variations spatiales du profil. En appliquant la fonction d'autocorrélation, la Figure 4-10 montre les variations de cette fonction pour les différents profils sablés de l'étude. Cette fonction est le résultat moyenné d'une série de dix profils de 10 mm de longueur chacun. La longueur caractéristique est alors déterminée pour chacun de ces profils. Pouvant être associée à une taille de cellule élémentaire, la longueur caractéristique, croît avec l'augmentation de la granulométrie du corindon utilisé pendant le sablage. Dans une certaine limite, plus le diamètre des particules abrasives est grand, plus les rugosités générées à la surface du substrat sont de grande taille (§2). Cela s'observe particulièrement entre les substrats d'aluminium 2024-T3 sablés finement et moyennement où l'on a respectivement de très petites rugosités et des plus grossières.

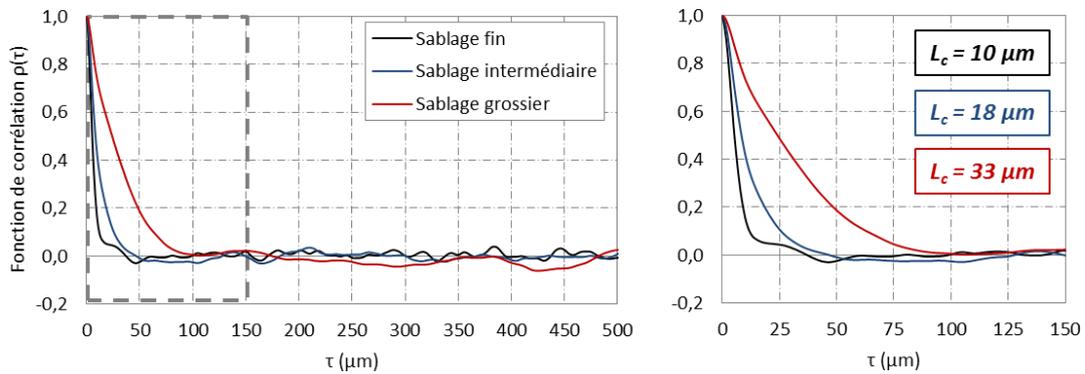


Figure 4-10 : Fonction de corrélation et longueur caractéristique L_c des profils 1D des substrats d'aluminium 2024-T3 sablés.

3.3. Proportion des vallées remplies par les particules

3.3.1. Méthode et hypothèses

La proportion de vallées remplies par une particule de diamètre D_p revient à caractériser une surface dont la morphologie est très aléatoire. Lors du procédé cold spray, les particules sphériques entrent en collision avec la surface et viennent se loger dans les vallées créées par le sablage. Dans le cas réel, les particules se déforment en modifiant par la même occasion la topographie du substrat (Chapitre 1, §2.2.1). La rugosité de surface est atténuée (Chapitre 3, 1.1.2) et le profil résultant est dilaté. Ce processus s'associe fortement à l'opérateur morphologique de fermeture décrit précédemment (§3.1), à ceci près qu'il impose de ne pas considérer les déformations plastiques des matériaux. Cette hypothèse de travail peut paraître limitante mais n'est, en fait, pas déterminante dans la caractérisation de la surface.

En associant le rayon de la particule au rayon du disque de fermeture, l'idée même de remplir une vallée peut s'exprimer de la manière suivante : plus le rayon r du disque est petit, plus la particule pénètre au fond de la vallée et la remplit par couches successives. La totalité des vallées est alors remplie lorsque le rayon du disque est nul (ou tend vers 0). A l'inverse, une particule de plus grand diamètre ne pourra pas s'enfoncer dans la vallée, en en laissant une partie non remplie. C'est le cas asymptotique, où le rayon du disque tend vers l'infini. Le profil y devient alors plan et correspond au plan horizontal passant par l'altitude maximale du profil initial. La Figure 4-11 illustre cette démarche de remplissage des vallées en fonction du rayon de fermeture.

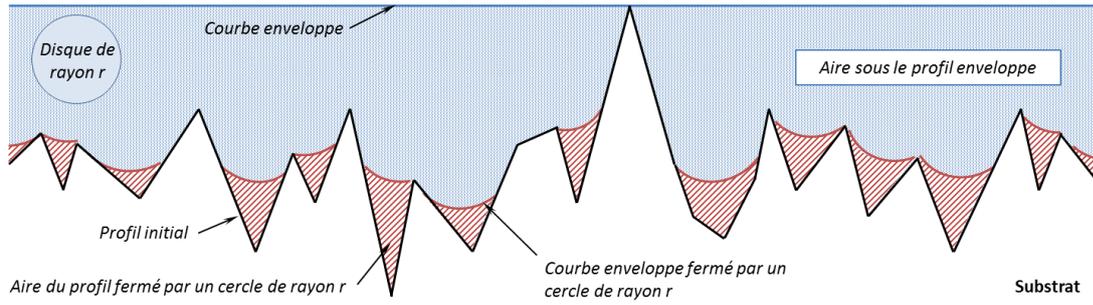


Figure 4-11 : Représentation schématique de remplissage morphologique des vallées du profil d'une surface rugueuse.

La fermeture par un disque coïncide avec l'enveloppe convexe de la zone située sous le profil. C'est elle qui est utilisée comme référence pour le calcul de la proportion des vallées remplies P_v . La courbe obtenue est une courbe décroissante paramétrée par r . L'aire sous le profil se détermine par le produit de la longueur du profil par la hauteur moyenne Z du profil. L'aire des vallées remplies A_v peut alors se déterminer par la différence entre l'aire du profil enveloppe et l'aire sous le profil initial. Le remplissage des vallées du profil, par des particules de rayon r , donne lieu à une courbe de comblement $P_v(r)$ décrit par l'équation 4.4 :

$$P_v(r) = \frac{Z_{\text{profil-enveloppe}} - Z_{\text{profil-fermé-par-un-cercle-de-rayon-r}}}{Z_{\text{profil-enveloppe}} - Z_{\text{profil-initial}}} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Ainsi, le rayon r_x nécessaire pour remplir un pourcentage x de la surface des vallées est déterminé (Figure 4-12). Les différents profils rugueux présentent des vallées dont les dimensions sont différentes. En fixant, par exemple, un remplissage des vallées de 50% ($P_v = 0,5$), la valeur du rayon de la particule évoluera.

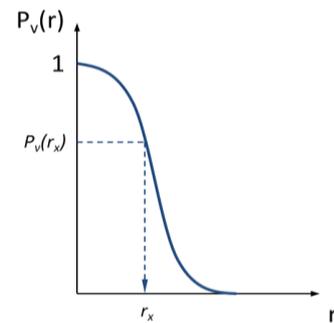


Figure 4-12 : Evolution de la proportion de vallées remplies d'un profil rugueux en fonction du rayon r de la particule.

3.3.2. Influence du diamètre de la particule

En appliquant les hypothèses présentées précédemment (§3.3.1), une détermination de la proportion des vallées remplies pour les différentes surfaces sablées est entreprise. Les courbes $P_v(r)$ sont résumées sur la Figure 4-13, où une différence significative entre les profils issus du sablage fin, intermédiaire et grossier est observée. Sans déformation plastique de l'ensemble particule-substrat, la petite dimension des vallées du profil sablé finement révèle une plus forte sensibilité de la surface au diamètre des particules. En effet, pour que les vallées soient remplies totalement, l'emploi de particules de faible diamètre est préconisé. Un diamètre de particule trop élevé fait abstraction des micro-rugosités de surface. Le remplissage des vallées de la surface est donc dépendant du diamètre des particules projetées. Une granulométrie de particules, comparable aux dimensions des vallées du profil, s'avèrerait donc indispensable pour caractériser plus précisément la morphologie de surface.

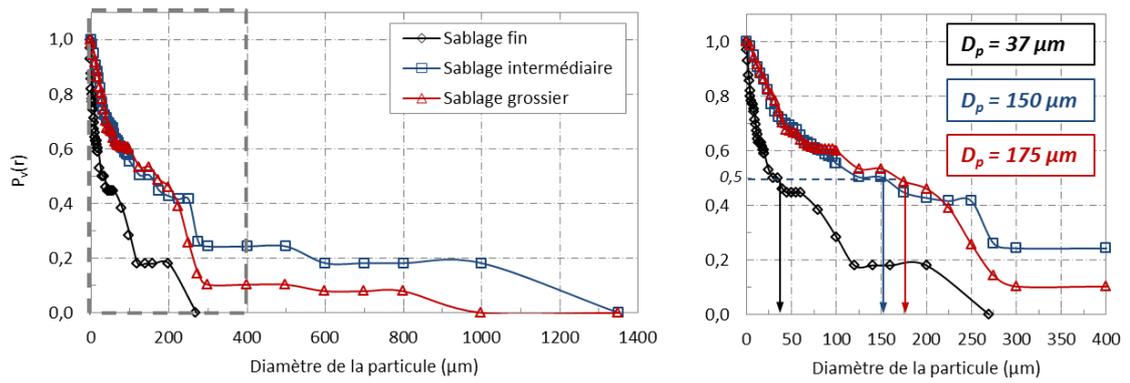


Figure 4-13 : Evolution de la proportion de vallées remplies en fonction du diamètre D_p de la particule pour différents états de surface du substrat d'aluminium 2024-T3 : sablage fin, intermédiaire et grossier.

4. Caractérisation dimensionnelle des vallées de surface

Dans cette partie, une analyse des rugosités du profil par une identification des cratères induits par le sablage de la surface est réalisée. La méthode consiste à identifier chacun des cratères assimilés à des vallées afin de caractériser leurs dimensions. L'angle d'ouverture et les dimensions des vallées sont déterminés pour être corrélés au diamètre des particules s'écrasant sur la surface (Figure 4-14). Cette approche, originale, doit permettre d'expliquer l'ancrage des particules sur des surfaces rugueuses dont la topographie est chaotique.

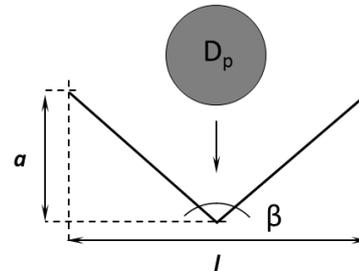


Figure 4-14 : Caractéristiques géométriques 1D d'une vallée issue d'une surface rugueuse vis-à-vis d'une particule de diamètre D_p .

4.1. Méthode d'analyse des vallées de surface

L'analyse morphologique du profil sablé permet de caractériser les dimensions des vallées. L'objectif est d'établir une répartition des dimensions des vallées, en hauteur et en largeur. Des hypothèses simplificatrices sont posées à travers la définition géométrique d'une vallée et un filtrage géométrique est choisi.

4.1.1. Définition d'une vallée

Une vallée se définit par deux maxima M_1 et M_2 et un minimum m (Figure 4-15a). La hauteur de cette vallée, notée H_v , est calculée comme la différence entre la moyenne des ordonnées des maxima ($[M_{1y} + M_{2y}]/2$) et l'ordonnée du minimum (m_y). La largeur, notée L_v , se définit, quant à elle, comme la différence entre les abscisses des deux maxima ($M_{1x} - M_{2x}$).

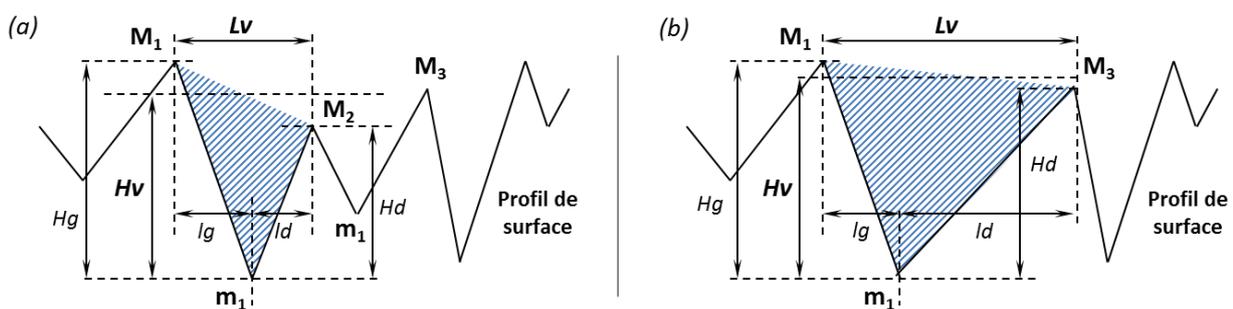


Figure 4-15 : Schéma d'une vallée définie par sa largeur et sa hauteur moyenne, (a) sans filtre et (b) avec filtre.

Des histogrammes sont ainsi établis pour les hauteurs des vallées sur l'ensemble du profil. La dispersion des valeurs apporte des éléments de réponse sur l'homogénéité spatiale des vallées. Dans la Partie 1 (§4.2), il est mis en évidence que la granulométrie du sable influence directement sur les dimensions des vallées du profil.

4.1.2. Filtrage des vallées du profil

La caractérisation des vallées de la surface sablée implique de toutes les considérer. Le processus de sablage induit des arrachements de matière et des micro-cisaillements à la surface générant de nombreuses petites vallées appelées micro-vallées (§1.1). Cependant, les particules ne sont, a priori, pas sensibles aux infimes variations géométriques de la surface, c'est-à-dire celles pour lesquelles les dimensions sont très petites devant le diamètre de la particule (Chapitre 1, §5.1.3). Ne pas tenir compte de ces micro-vallées lors de l'analyse est donc essentiel, d'autant plus que la multiplicité de ces rugosités ne permet pas une caractérisation efficace de la surface. En effet, le grand nombre de petites rugosités masque les vallées de grande taille, les rendant ainsi peu nombreuses donc difficilement caractérisables.

Le filtrage du profil passe par le choix d'un critère géométrique en lien avec les dimensions des vallées. En éliminant les hauteurs les plus petites, seules celles qui ont une influence sur la déformation plastique de la particule sont conservées. Pour cela, les couples min / max successifs sont exclus des vallées retenues quand leur hauteur h est inférieure à la valeur F du filtre (Figure 4-15b). Afin d'être généralisé, ce filtre, appliqué à la hauteur des vallées, est déterminé proportionnellement au diamètre de la particule D_p . Il est ainsi valable quel que soit le rayon de la particule venant au contact du substrat. Le filtre F donne une distribution géométrique des rugosités qui évolue sensiblement. Les résultats sont présentés avec un pas de mesure de $2 \mu\text{m}$ pour la hauteur et de $5 \mu\text{m}$ pour la largeur des vallées.

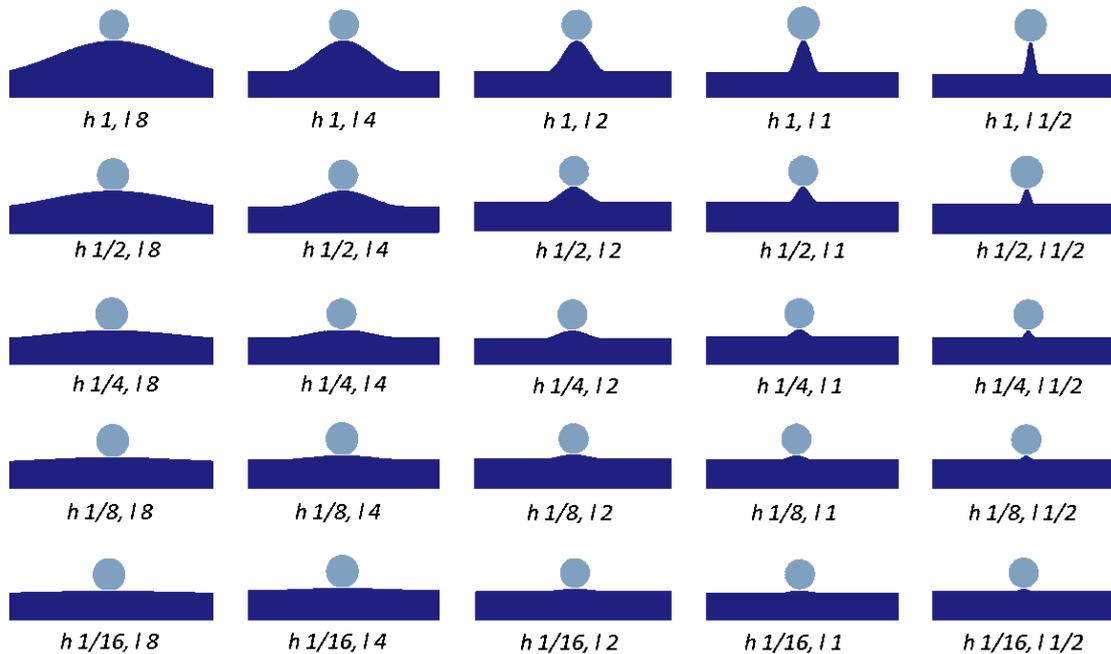


Figure 4-16 : Configurations d'impact d'une particule d'aluminium pur 1050 sur un pic défini par une largeur et une hauteur, pour un substrat d'aluminium 2024-T3.

Pour déterminer le seuillage à appliquer, une simulation numérique par éléments finis est entreprise avec pour objectif de déposer une particule sur un pic dont l'amplitude et la largeur sont définis par rapport au diamètre de la particule. Les caractéristiques géométriques du pic constituant le substrat sont résumées sur la Figure 4-16. La forme du pic est représentée par une sinusoïde de type $(a/2)(1 + \cos(\pi x/\lambda))$, d'amplitude a et de longueur d'onde λ . Ces dernières sont des multiples de D_p , fixé à $20 \mu\text{m}$. Trois vitesses d'impact sont essayées : $500, 600$ et $700 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La simulation de l'impact d'une particule sur le milieu d'un pic est un cas idéal

qui, statistiquement, ne se produit que rarement mais qui a pour intérêt de représenter le cas le plus défavorable. En effet, la particule tendant à glisser au fond de la vallée dans tous les autres cas [DEL15], les déformations plastiques sont maximales si la particule heurte le pic en son milieu. Ce pic est caractérisé par une hauteur h et une largeur l à sa base, où $h = a$ et $l = \lambda/2$.

Un critère d'atténuation morphologique est donc défini par rapport au diamètre de la particule et consiste à identifier les caractéristiques géométriques critiques du pic à partir desquelles l'énergie de la particule est suffisante pour en atténuer les dimensions. La Figure 4-17 donne les résultats (température et déformation plastique équivalente) des simulations d'impact pour différentes vitesses de particules. L'analyse des résultats peut se résumer à travers les conclusions suivantes :

- *Macro-rugosité* ($h \geq D_p/2$) : la déformation plastique du substrat est très faible mais celle de la particule est particulièrement élevée ;
- *Méso-rugosité* ($h = D_p/4$) : la géométrie du pic est partiellement atténuée mais demeure déterminante dans l'étalement de la particule ;
- *Micro-rugosité* ($h < D_p/4$) : les pics sont gommés et n'ont pas d'influence morphologique significative sur la déformation de la particule. Les seuls effets notables sont l'amortissement énergétique provoqué par leur déformation plastique ainsi que la concentration de contrainte (Chapitre 1, §5.1.3) [DEL15].

Les résultats de simulation des impacts à 500, 600 et 700 $m.s^{-1}$ donnent des tendances similaires concernant l'atténuation des rugosités du substrat. Des valeurs de filtre peuvent alors être déduites et appliquées à l'analyse morphologique des surfaces sablées. Fortement présentes à cause de la modification de la surface par sablage, les micro-rugosités, dont la hauteur est inférieure à $D_p/4$, sont donc éliminées du profil. Ce dernier, résultant du filtrage, donne les vallées les plus influentes sur la déformation plastique des particules.

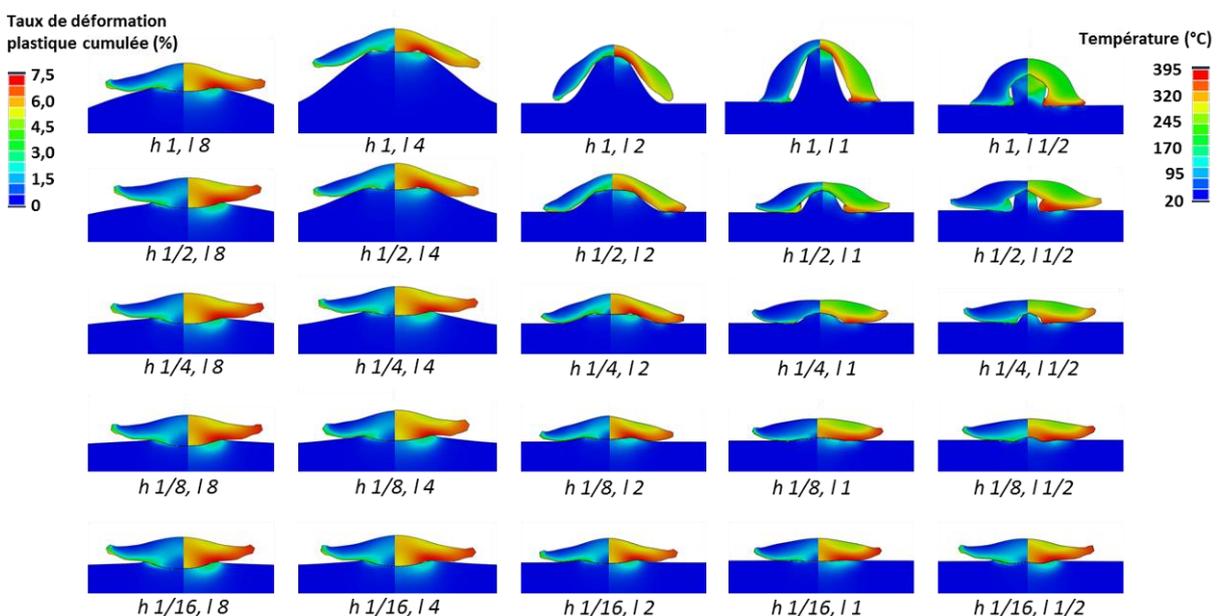


Figure 4-17 : Résultats de simulation d'impact (déformation plastique cumulée, à gauche, et température, à droite) d'aluminium pur 1050 sur substrat d'aluminium 2024-T3 pour une vitesse d'impact de 700 $m.s^{-1}$.

4.2. Dimensions géométriques des vallées

L'objectif de cette partie est de caractériser les dimensions des vallées du profil afin d'en extraire les amplitudes et les largeurs. Elles permettront de donner une répartition numérique de ces paramètres sur l'intégralité de la surface sablée. Cette répartition sera utilisée pour la construction d'un profil équivalent issu de l'analyse topographique des surfaces rugueuses. La granulométrie de la poudre projetée est étendue et les diamètres caractéristiques : 10, 30 et 50 μm des particules sont utilisés comme valeur de filtre afin d'établir l'évolution des dimensions des vallées du profil sablé.

4.2.1. Détermination de l'amplitude des vallées

Sur la Figure 4-18, la surface sablée finement se distingue des autres surfaces par des vallées de plus faible hauteur mais plus nombreuses. De plus, les sablages de type intermédiaire et grossier donnent des amplitudes de vallées similaires. Ces amplitudes des vallées sont significativement plus élevées même si leurs valeurs s'étendent de 2 à 30 μm en comparaison avec la surface sablée finement où la hauteur est comprise entre 2 et 15 μm . Même avec un filtrage relativement prononcé ($F = 7,5$), la différence entre les trois niveaux de rugosité de surface est marquée. Les particules projetées sur une surface peu rugueuse vont surtout écraser les vallées, les plus petites. A l'inverse, les amplitudes les plus élevées, mesurées sur les surfaces sablées plus grossièrement, favorisent l'ancrage mécanique avec une pénétration des particules dans le substrat plus grande. Pour un même diamètre de particule, les rugosités ne peuvent être effacées que partiellement et la morphologie de surface est ainsi pleinement considérée. Le décrochage observé pour un niveau de filtre élevé ($F = 12,5 \mu\text{m}$, Figure 4-18d), traduit la présence aléatoire de plus hauts pics, en surface du substrat sablé finement. Ces aberrations morphologiques sont d'autant plus atténuées que l'amplitude des vallées est grande. C'est pourquoi, ce phénomène ne se retrouve pas sur les sablages intermédiaire et grossier.

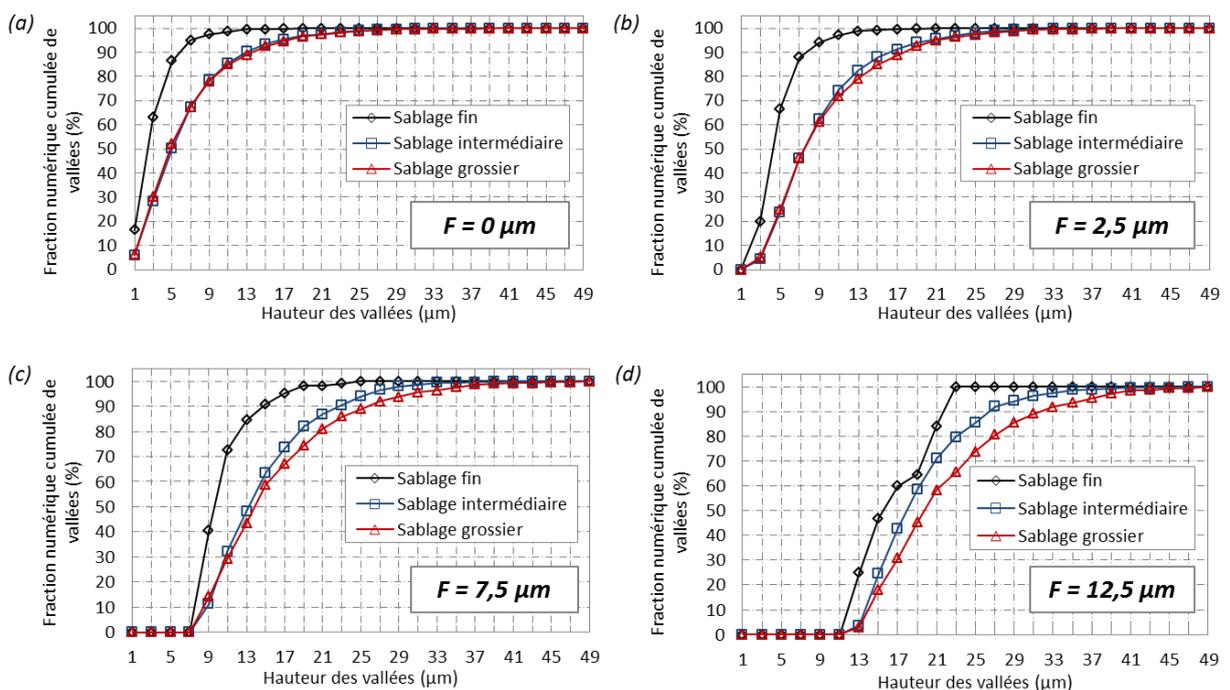


Figure 4-18 : Dispersion des hauteurs des vallées des profils de substrats d'aluminium 2024-T3 sablés (a) sans filtrage, $F = 0$ et avec filtrage, (b) $F = 2,5 \mu\text{m}$ ($D_p = 10 \mu\text{m}$), (c) $F = 7,5 \mu\text{m}$ ($D_p = 30 \mu\text{m}$) et (d) $F = 12,5 \mu\text{m}$ ($D_p = 50 \mu\text{m}$), $D_p = 4 * F$.

4.2.2. Détermination de la largeur des vallées

Une particule pénètre au fond de la vallée d'autant plus que la distance entre ses deux maxima est grande et que son diamètre est faible. Afin de maximiser la probabilité d'ancrage de la particule, une largeur la plus grande possible est privilégiée, tout en conservant une surface rugueuse. Plus cette distance est faible, plus il est difficile pour la particule de pénétrer au fond de la vallée. Définie à partir des dimensions de la vallée, cette distance évolue suivant deux cas :

- $L_v > H_v$: grand angle d'ouverture ;
- $H_v > L_v$: faible angle d'ouverture.

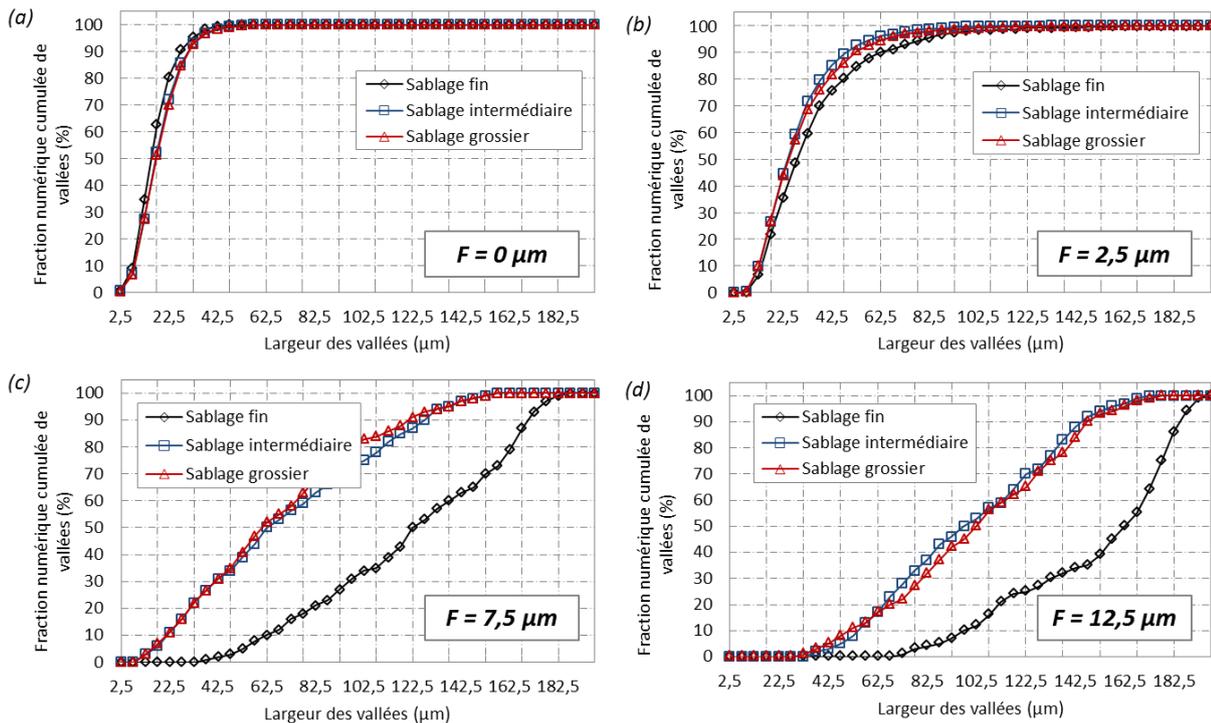


Figure 4-19 : Dispersion des largeurs des vallées des profils de substrat d'aluminium 2024-T3 sablés (a) sans filtrage, $F = 0$ et avec filtrage, (b) $F = 2,5 \mu\text{m}$ ($D_p = 10 \mu\text{m}$), (c) $F = 7,5 \mu\text{m}$ ($D_p = 30 \mu\text{m}$) et (d) $F = 12,5 \mu\text{m}$ ($D_p = 50 \mu\text{m}$), $D_p = 4 \cdot F$.

A l'instar du paramètre de hauteur des vallées, les largeurs des vallées sont mesurées par la même méthode. En considérant différents niveaux de filtre F , les résultats de la Figure 4-19 montrent une répartition de la largeur très resserrée pour le profil non filtré. Les valeurs s'étendent de 2 à 50 μm avec une médiane $d(0,5)$ s'établissant aux alentours de 15 μm pour le substrat sablé finement et de 18 μm pour les substrats sablés plus grossièrement. La largeur des vallées est plus grande lorsque le diamètre moyen des particules abrasives est plus grand. Les vallées sont plus étroites mais plus nombreuses pour la surface sablée finement. En augmentant la valeur du filtre, de nombreuses vallées, dont la hauteur est faible par rapport au diamètre de la particule ($H_v = D_p/4$), sont éliminées. La majorité des vallées ont une largeur supérieure à D_p et peuvent prétendre à un ancrage mécanique accru. Plus F est élevé, plus les largeurs sont grandes. Dans le cas des surfaces sablées finement, la morphologie initiale donne une grande disparité des largeurs ($> 100 \mu\text{m}$) pour $F > 2,5$. Les macro-vallées ressortent car avant l'utilisation du filtre, elles étaient « cachées » par les micro-vallées. Des vallées très larges sont ainsi vues par la particule. Ces résultats ne sont pas rencontrés pour les autres surfaces sablées où la largeur des vallées est comprise entre 20 et 60 μm . Ces différences de largeur des vallées expliquent pourquoi la particule rencontre des rugosités de taille comparable à son diamètre. Dans le

cas où L_v est au moins égale à D_p , sans être trop grand ($L_v < 2D_p$), l'ancrage mécanique de la particule est favorisé.

4.3. Bilan sur la morphologie des vallées

L'analyse des profils des substrats sablés révèle le rôle majeur de la morphologie des rugosités et particulièrement à travers leurs dimensions. Les critères de largeur et de hauteur sont évalués et permettent de mettre en avant un facteur géométrique déterminant dans l'ancrage mécanique des particules. En déterminant les valeurs médianes des paramètres géométriques (largeur et hauteur) des vallées ($d(0,5)$), l'influence du diamètre de la particule D_p est mise en évidence (Figure 4-20).

Les différents sablages se regroupent suivant deux tendances bien distinctes : le sablage à faible granulométrie de corindon (fin) et le sablage grossier associant les états de surface sablé moyennement et grossièrement. Les conclusions suivantes sont établies au regard des dimensions des rugosités des surfaces sablées :

- Surface sablée finement : les vallées sont nombreuses et étroites ($15 \mu\text{m}$). A partir d'un diamètre de particule de $30 \mu\text{m}$, les vallées du substrat sont très larges et de faible amplitude. La particule rencontre donc une surface considérée comme plane ;
- Surface sablée grossièrement : la largeur médiane est de taille comparable à celle du diamètre des particules. Pour $D_p > 10 \mu\text{m}$, la hauteur médiane de la vallée est $D_p/2$, ce qui favorise l'ancrage mécanique. Globalement, les vallées du substrat ont une hauteur plus élevée, environ deux fois plus grande que dans le cas des surfaces sablées finement.

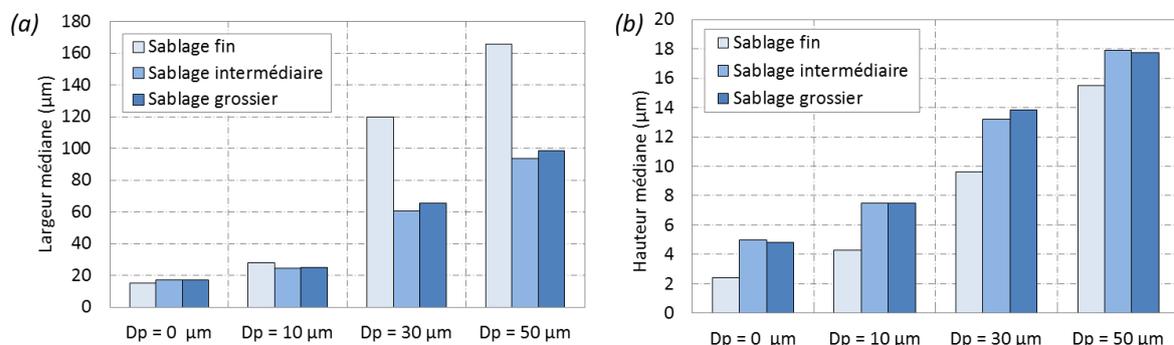


Figure 4-20 : Valeurs médianes (a) des largeurs L_v et (b) des hauteurs H_v des vallées des profils de substrats d'aluminium 2024-T3 sablés en fonction du niveau de filtre F , c'est-à-dire du diamètre de la particule, $D_p = 4 \cdot F$.

Comparer les dimensions des vallées en fonction de l'état de surface du substrat et du diamètre de particules permet d'appréhender les mécanismes d'ancrage des particules. A partir des résultats énoncés, un rapport entre la hauteur et la largeur de la vallée est établi, et noté Δ . Plus ce rapport est petit, plus la vallée est large avec une hauteur faible. A l'inverse, plus il est élevé, plus la hauteur de la vallée est grande en comparaison de sa largeur. Si $\Delta = 0$, alors la vallée n'existe pas et la surface est considérée comme plane.

Des profils dits équivalents et résultants de cette analyse topographique, sont définis pour une valeur de filtre égale à zéro. Lorsque le filtre devient positif, le profil équivalent est associé à un profil équivalent vu par la particule. La représentation de ces profils est illustrée à travers les schémas de la Figure 4-21. Ces derniers résument la morphologie des profils vus par une particule de diamètre D_p pour différentes tailles de particules, et mettent en évidence les différences majeures en fonction de la rugosité du substrat. A l'échelle

locale, la morphologie de surface présente des arrêtes arrondies. La forme de la vallée est alors représentée par une sinusoïde de type $(a/2)(1 + \cos(\pi x/\lambda))$, d'amplitude a et de longueur d'onde λ . Ces dernières sont des multiples de D_p . La vallée est caractérisée par une hauteur médiane H_{v_m} et une largeur médiane L_{v_m} à sa base, où $H_{v_m} = 2a$ et $L_{v_m} = \lambda$. Deux configurations sont remarquables et sont reprises pour la simulation d'impact décrite dans le Chapitre 5 (§4.2.1) :

- Les particules de grand diamètre ($D_p > 10 \mu\text{m}$) : pour une surface sablée finement, $\Delta = 1/12$, alors que pour les surfaces sablées grossièrement, $\Delta = 1/4$. L'augmentation des hauteurs des vallées, et, a fortiori, de la longueur de l'interface particule-substrat, accroît la probabilité d'ancrage mécanique des particules dans le substrat. La profondeur de pénétration des particules y est donc plus forte (Figure 4-21a) ;
- Les particules dont le diamètre est plus faible ($D_p \leq 10 \mu\text{m}$) : les surfaces sablées finement et grossièrement possèdent un Δ , respectivement égal à $1/5$ et $1/3$. Les largeurs et les hauteurs des vallées sont sensiblement équivalentes quelle que soit la morphologie de surface du substrat (Figure 4-21b). La profondeur de pénétration des particules est ainsi favorisée quel que soit l'état de surface considéré.

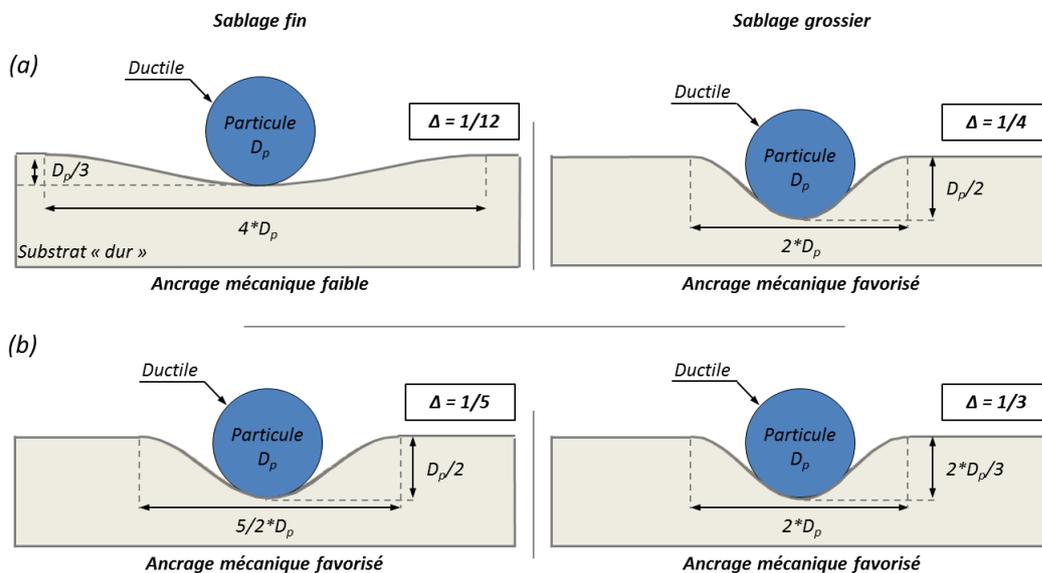


Figure 4-21 : Profils équivalents vus par les particules d'un substrat rugueux, sablé finement (à gauche) et grossièrement (à droite) : influence de la largeur et de la hauteur des vallées comparativement au diamètre de la particule (a) $D_p > 10 \mu\text{m}$ et (b) $D_p \leq 10 \mu\text{m}$.

Conclusion sur l'analyse topographique de la surface

La caractérisation approfondie des surfaces modifiées morphologiquement par sablage a été réalisée et a montré des différences notables suivant la granulométrie du corindon utilisé. Une analyse morphologique et dimensionnelle des surfaces aléatoires et rugueuses a été entreprise pour appréhender les mécanismes de déformation et d'encastrement des particules dans les vallées des substrats sablés. Plusieurs résultats majeurs sont ainsi relevés en fonction de la granulométrie des particules abrasives choisie et de la poudre projetée (Tableau 4-7). Si les particules ont un diamètre inférieur ou égal à $10\ \mu\text{m}$, l'ancrage serait davantage favorisé pour un sablage fin. L'inverse serait vrai pour un sablage grossier.

Tableau 4-7 : Paramètres caractéristiques et morphologiques des surfaces rugueuses d'aluminium 2024-T3 sablées finement et grossièrement en fonction du diamètre D_p des particules.

Diamètre de la particule	Surface sablée finement		Surface sablée grossièrement	
	$D_p \leq 10\ \mu\text{m}$	$D_p > 10\ \mu\text{m}$	$D_p \leq 10\ \mu\text{m}$	$D_p > 10\ \mu\text{m}$
Surface de contact	Elevée	Faible	Elevée	Elevée
Longueur caractéristique L_c	Petite	Petite	Moyenne	Moyenne
Dimensions des vallées	Comparables à D_p	Très petites	Elevée	Comparables à D_p
Hauteur H_v	Petites	Petites	Elevée	Elevée
Largeur L_v	Petites	Petites	Moyenne	Moyenne
Ancrage des particules	Favorisé	Faible	Favorisé	Favorisé

L'analyse des surfaces, par la caractérisation des profils rugueux, permet l'obtention de paramètres géométriques amenant à la construction d'une surface sablée dite équivalente. Les paramètres de hauteur et de largeur sont pris en considération pour la représentation de ces surfaces équivalentes et représentatives des rugosités générées par le sablage. Ces profils sont, d'ailleurs, utilisés dans la simulation d'impact sur substrat rugueux, présentée dans le Chapitre 5 (§4.2).