



HAL
open science

Analyse numérique de l'étalabilité d'une poudre métallique : Application au procédé de fabrication additive Laser Beam Melting

Kevin Marchais

► **To cite this version:**

Kevin Marchais. Analyse numérique de l'étalabilité d'une poudre métallique : Application au procédé de fabrication additive Laser Beam Melting. Génie mécanique [physics.class-ph]. HESAM Université, 2021. Français. NNT : 2021HESAE035 . tel-03663374

HAL Id: tel-03663374

<https://pastel.hal.science/tel-03663374>

Submitted on 10 May 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
I2M - Campus de Bordeaux

THÈSE

présentée par **Kevin MARCHAIS**

Ingénieur ENSEIRB-MATMECA - Mathématiques et Mécanique
soutenue le **6 juillet 2021**

pour obtenir le grade de **Docteur d'HESAM Université**

préparée à l' **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

Spécialité : **Procédés de fabrication - Génie mécanique**

**Analyse numérique de l'étalabilité d'une poudre métallique :
Application au procédé de fabrication additive Laser Beam Melting**

THÈSE DIRIGÉE PAR :
M. IORDANOFF Ivan

ET CO-ENCADRÉE PAR :
M. GIRARDOT Jérémie

Jury

M. Éric CHARKALUK, Directeur de recherche CNRS, École Polytechnique
M. Christophe MARTIN, Directeur de Recherche CNRS, Université Grenoble Alpes
M. Marc THOMAS, Directeur de recherche, ONERA DMAS
M^{me} Clara MORICONI, Ingénieure de recherche, Safran Additive Manufacturing
M. Robin KROMER, Maître de conférences, Université de Bordeaux, I2M
M. Ivan IORDANOFF, Professeur des Universités, I2M, Arts et Métiers Sciences et Technologies
M. Jérémie GIRARDOT, Chercheur, I2M, Arts et Métiers Sciences et Technologies
M^{me} Charlotte METTON, Ingénieure de recherche, Safran Additive Manufacturing

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examinatrice
Examinateur
Examinateur
Examinateur
Invitée

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier tous les membres du jury qui ont accepté d'évaluer mes travaux de thèse.

Je remercie vivement Ivan Iordanoff, mon directeur de thèse, et Jérémie Girardot, co-encadrant, qui m'ont proposé un encadrement de très grande qualité et dont les précieux conseils durant ces années m'ont permis d'en arriver là. Je remercie également Charlotte Metton qui m'a encadré du côté industriel de ce travail et dont l'aide a été très importante.

Ce travail de thèse a été réalisé dans le cadre d'un financement CIFRE avec Safran et l'I2M de Bordeaux au sein de l'école des Arts et Métiers. Je tiens à remercier ces structures qui m'ont accueilli. Ce travail fait partie de la plateforme de collaboration Additive Factory Hub entre divers organismes de recherche de la région Île de France. A travers les différents rassemblements, j'ai eu l'occasion de bénéficier de remarques et d'avis d'experts toujours très intéressants, je les remercie.

Lors de mes séjours chez Safran ou à travers divers réunions j'ai pu bénéficier de l'aide, des connaissances et des conseils de Clara Moriconi, Rémi Giraud, Daniel Cornu, Alexandre Charles, Romain Bergeron. Je tiens à les remercier particulièrement. Je remercie également les autres ingénieurs avec qui j'ai eu l'occasion d'échanger. Merci à Bénédicte Valette et Anne Thenaisie pour m'avoir accueilli au sein de Safran Additive Manufacturing au cours de ma thèse.

Je tiens également à remercier vivement Alexis Queva et Yaasin Mayi avec qui j'ai passé de bons moments puisqu'on a tous les trois menés nos thèse en parallèle au sein du même projet. Je remercie également leurs encadrants Gildas Guillemot, Michel Bellet, Morgan Dal et Patrice Peyre qui m'ont également apportés beaucoup d'aide au cours des différentes réunions qu'on a pu avoir ensemble.

Je remercie Nicolas Saintier et Thierry Palin-Luc pour m'avoir accueilli au sein du département DuMAS ainsi que Frédéric Dau, Philippe Viot et Jean-Benoit Kopp pour m'avoir accueilli au sein de l'équipe Dynamics. Merci aux différents membres du laboratoire que j'ai pu côtoyer au cours de ces trois années : Mohamed El May,

Yves Chemisky, Jonathan Merzeau, Christophe Lemaire, Valentin Honno, Charles Brugger, Catherine Froustey, Robin Kromer. Je remercie vivement Louise Le Barbenchon, nouvelle diplômée, avec qui je suis arrivé au sein du laboratoire le même jour, pour son extrême gentillesse et l'aide toujours précieuse qu'elle m'a apporté. Je remercie aussi les récents et futurs docteurs avec qui j'ai eu l'occasion de partager l'open space et de passer des bons moments : Simon Dousset, Lucien Cadieu, Benjamin Croquelois, Ilan Raphael, Alexandre Messenger, Bastien Vayssette, Pietro del Sorbo, Lorenzo Cappelli, Khalil Refai, Camille Rousseau, Marie Pirotais, Margaux Sage, Luc Brémaud.

Enfin merci à mes amis et ma famille qui m'ont toujours soutenu, en particulier un grand merci à mes parents.

Résumé

Le procédé de fusion laser de lit de poudre est un procédé de fabrication par addition de couches de matière où chaque couche est produite par une phase d'étalement de poudre et une phase de fusion laser. Il s'agit d'un procédé relativement nouveau, en phase de développement pour produire des pièces en métal. Pour continuer à développer le procédé, il faut pouvoir produire des pièces de meilleure qualité, plus rapidement et en plus grande quantité. Pour cela, les paramètres procédé, comme par exemple la vitesse du racleur ou l'épaisseur de couche, peuvent être ajustés pour réduire le temps de production ou encore la qualité de la pièce finale. Le lit de poudre doit être de bonne qualité pour que la phase de fusion laser puisse se dérouler sans défauts. Afin de mieux comprendre l'effet des paramètres procédés sur la qualité du lit de poudre, un modèle numérique a été développé pour simuler le procédé d'étalement de poudre. Afin de réaliser une simulation représentative du comportement réel des grains, il faut pouvoir identifier la valeur des paramètres matériaux de la poudre, en particulier l'adhésion. C'est pourquoi un protocole de caractérisation de l'énergie d'adhésion d'un échantillon de poudre a été développé. Il est basé sur la comparaison entre un essai expérimental et une simulation équivalente. Enfin, une méthode de caractérisation de la qualité du lit de poudre basée sur le calcul de la diffusivité thermique a été développée pour analyser les résultats d'analyses paramétriques. L'analyse de l'effet des paramètres procédé sur la qualité du lit de poudre a livré plusieurs résultats. Par exemple, le rapport entre l'épaisseur de lit de poudre et la taille de grain joue un rôle de premier ordre dans la qualité du lit de poudre. Aussi, à la différence des règles actuelles, un faible écart-type de la distribution granulométrique permet d'obtenir un meilleur lit de poudre pour de si faibles épaisseurs de couche.

Mots-clés : Méthode des Éléments Discrets, Fabrication additive, Lit de poudre, Simulation numérique, Comportement granulaire, Étalabilité

Abstract

The powder bed laser melting process is an additive manufacturing process where each layer is produced by a powder spreading phase and a laser phase. To develop the process further, it is necessary to be able to produce parts of better quality, faster and in larger quantities. For this purpose, process parameters such as the spreader speed or the layer thickness can be adjusted to reduce the production time or the final part quality. The powder bed must be of good quality to have a good laser phase. A numerical model was developed to simulate the powder spreading process and better understand the effect of process parameters on the powder bed quality. To perform a representative simulation of the real behavior of the grains, it is necessary to be able to identify the value of the material parameters of the powder, in particular the adhesion. This is why a protocol for characterizing the adhesion energy of a powder sample has been developed. It is based on the comparison between an experimental test and an equivalent simulation. Finally, a method for characterizing the quality of the powder bed based on the calculation of the thermal diffusivity was developed to analyze the results of parametric analyses. The analysis of the effect of the process parameters on the powder bed quality yielded several results. Among these, it showed that the ratio of the powder bed thickness to particle size plays a major role in the powder bed quality. Also, unlike the current rules, a low standard deviation of the particle size distribution allows to obtain a better powder bed for such small layer thicknesses.

Keywords : Discrete Element Method, Additive manufacturing, Powder bed, Numerical simulation, Granular behaviour, Spreadability.

Table des matières

Remerciements	III
Résumé	V
Abstract	VII
Table des matières	XIII
Liste des figures	XX
Liste des tableaux	XXI
Introduction	1
1 Contexte et enjeux	5
1.1 Fabrication additive	8
1.1.1 Historique	8
1.1.2 Principe de fonctionnement	9
1.1.3 Intérêts de la fabrication additive	9
1.2 Procédés de fabrication additive à base de poudre	14
1.2.1 Fabrication additive lit de poudre	14
1.2.1.1 Procédé de fusion laser sur lit de poudre métallique .	14
1.2.1.2 Electron Beam Melting	19
1.2.1.3 Selective Laser Sintering	19
1.2.1.4 Projection de liant	19
1.2.2 Fabrication additive directe	20

TABLE DES MATIÈRES

1.2.2.1	Directed Energy Deposition	20
1.2.2.2	Procédés dérivés du DED	21
1.3	Verrous technologiques	22
1.4	Poudre métallique et caractérisation	25
1.4.1	Poudres pour le procédé LBM	25
1.4.1.1	Inconel 718	26
1.4.1.2	TA6V	26
1.4.2	Atomisation des poudres	26
1.4.3	Caractérisation des poudres	28
1.4.3.1	Granulométrie	28
1.4.3.2	Morphologie	29
1.4.3.3	Coulabilité	30
1.4.3.4	Cohésion	31
1.4.3.5	Essais de caractérisation	32
1.4.3.6	Essais expérimentaux de l'étalabilité de la poudre	36
1.5	Simulation de milieux granulaires	37
1.5.1	Domaines d'applications	37
1.5.2	Méthodes particulières	38
1.5.2.1	Molecular Dynamics	38
1.5.2.2	Méthode des éléments discrets	38
1.5.2.3	Non-Smooth Contact Dynamics	39
1.5.3	Méthodes non-particulières	40
1.5.3.1	Smoothed Particle Hydrodynamics	40
1.5.3.2	CFD	40
1.6	Simulation numérique de l'étalement de poudre	41
1.6.1	Modélisation du procédé	41
1.6.2	Principaux résultats de l'étude bibliographique	47
1.7	Verrous scientifiques	51
2	Modélisation numérique de l'étalement de poudre	53
2.1	Méthode des éléments discrets	55

2.1.1	Principe de fonctionnement	55
2.1.2	Choix du code de calcul	55
2.2	Description du modèle géométrique	56
2.2.1	Modélisation de la poudre	57
2.2.2	Modélisation du procédé	60
2.2.2.1	Système de mise en couche	60
2.2.2.2	Alimentation en poudre	61
2.2.2.3	Paramètres procédé	62
2.2.3	Rugosité de surface	63
2.3	Description du modèle de comportement	66
2.3.1	Lois d'interactions entre les grains	66
2.3.2	Intégration numérique du mouvement	69
2.4	Optimisations numériques	71
2.4.1	Méthode de détection des contacts	71
2.4.2	Conditions périodiques	74
2.5	Choix du domaine d'étude	75
2.6	Choix des paramètres numériques	78
2.6.1	Raideur	78
2.6.2	Coefficient de restitution	79
2.6.3	Coefficient de frottement	79
2.6.4	Énergie d'adhésion	79
2.7	Conclusion	79
3	Méthodologie de caractérisation des paramètres matériaux	81
3.1	Études préliminaires de l'influence des paramètres matériaux	83
3.1.1	Propriétés du lit de poudre	83
3.1.2	Coefficient de frottement	84
3.1.3	Énergie d'adhésion	85
3.2	Modèle analytique d'adhésion	87
3.2.1	Force de Van der Waals et modèle aqueux	87
3.2.2	Modèle avec aspérités	89

3.3	Analyse des essais de caractérisation existants	91
3.3.1	Tambour tournant	91
3.3.1.1	Essai expérimental	91
3.3.1.2	Modèle numérique	93
3.3.1.3	Conclusion	95
3.3.2	Essai de coulabilité	95
3.3.2.1	Cône de Hall/Carney expérimental	96
3.3.2.2	Modèle numérique	97
3.3.2.3	Conclusion	98
3.3.3	Angle de talus	98
3.4	Choix de l'essai de caractérisation	100
3.4.1	Modélisation numérique	101
3.4.2	Conditions axi-périodiques rectilignes	107
3.4.3	Conclusion	112
3.5	Conclusion	112
4	Simulation et compréhension de l'étalement	115
4.1	Études de l'influence de paramètres procédé	117
4.1.1	Vitesse du racleur	117
4.1.2	Granulométrie	118
4.2	Caractérisation de la qualité du lit de poudre	120
4.2.1	Évaluation de la densité par analyse d'image	121
4.2.1.1	Protocole d'analyse par seuillage en vue de dessus	121
4.2.1.2	Profilométrie	121
4.2.2	Mesure de la diffusivité thermique	122
4.2.2.1	Méthode Flash	123
4.2.2.2	Modèle numérique	123
4.3	Analyse des paramètres procédé	127
4.3.1	Définition d'un paramètre réduit	127
4.3.2	Rugosité	129
4.3.3	Granulométrie	131

4.3.4	Adhésion	133
4.3.5	Vitesse racleur	134
4.4	Conclusion	137
Conclusions générales		139
Perspectives		141
A Essais expérimentaux d'angle de talus		153
A.1	Essais avec Inconel	153
A.2	Essais avec Ti6Al4V	165

Liste des figures

1	Trois thèses Safran sur le procédé LBM dans le cadre AFH	2
1.1	Optimisation topologique d'une pièce [5]	10
1.2	Moteur LEAP qui embarque des pièces imprimées par LBM	12
	(a) Injecteur de carburant LEAP	12
	(b) Moteur LEAP	12
1.3	Moteur Prometheus	13
1.4	Schéma du procédé LBM [11]	15
1.5	Exemple de machine LBM (SLM Solutions)	17
1.6	Résolution de la pièce : grossière à gauche, fine à droite	18
1.7	Schéma du procédé Multi Jet Fusion [12]	20
1.8	Image d'illustration du principe de fonctionnement du procédé CLAD créé par IREPA LASER [13]	21
1.9	Phénomène de keyhole qui creuse la matière [16]	22
1.10	Racleurs endommagés	23
1.11	Différence d'épaisseur de couche étalée/fusionnée	24
	(a) Lit de poudre avant fusion	24
	(b) Couche solide après fusion	24
1.12	Grains de poudre de TA6V et répartition des tailles	26
1.13	Image d'un jet liquide qui se brise pour former des gouttelettes [26] .	27
1.14	Schéma d'une machine d'atomisation [27]	27
1.15	Morphogranulomètre laser	28
1.16	Paramètre morphologiques [35]	30
	(a) Sphéricité	30

(b) Rondeur	30
1.17 Pont capillaire entre deux particules	32
1.18 Angle de talus	33
1.19 Tambour tournant [37]	34
1.20 Résultat obtenu avec une poudre d'inconel	34
1.21 Cône de Hall	35
1.22 Densité tassée [38]	36
1.23 Méthode CFD pour la simulation d'écoulements granulaires [65]	41
1.24 Particules non sphériques de PA12 (polymère) [66]	42
1.25 Cluster de sphères, grains de 316L [67]	43
1.26 Optimisation de la forme du racleur [11]	44
1.27 Influence de l'adhésion sur l'angle de talus [73]	46
1.28 Comparaison simulation/expérience [73]	47
1.29 Comparaison entre le profil expérimental et le profil simulé de la poudre lors de l'étalement par la lame pour différents rayons moyens de particules (a) $R = 84.7\mu m$, (b) $R = 61.6\mu m$, (c) $R = 17.4\mu m$, (d) $R = 12.2\mu m$ [57]	48
1.30 Influence de la hauteur de l'intervalle racleur/plateau [67]	49
1.31 Étalement de poudre pour différentes épaisseurs de couche et diffé- rentes adhésions [58]	50
2.1 Exemple d'un fichier INP pour un cas d'exemple	56
2.2 Particules très sphériques	58
(a) IN718	58
(b) Ti6Al4V [82]	58
2.3 Outil de génération d'échantillon numérique	60
2.4 Méthode de modélisation de la géométrie du racleur	61
2.5 Génération de la poudre par pluviation (vidéo)	62
(a) État initial	62
(b) État final	62
2.6 Surface rugueuse générée par pluviation (Vue de côté)	63
2.7 Plateau rugueux (Vue de dessus)	63

2.8	Influence de la rugosité de surface	65
	(a) plateau lisse	65
	(b) $\varnothing = 7 \mu m$	65
	(c) $\varnothing = 30 \mu m$	65
	(d) $\varnothing = 50 \mu m$	65
2.9	Schéma d'un contact en DEM	66
2.10	Mouvement angulaire	67
2.11	Régularisation du modèle de frottement	69
2.12	Schéma de la méthode LCM	72
2.13	Schéma de la méthode HGrid [98]	73
2.14	Conditions périodiques	75
2.15	Domaine d'étude	76
2.16	Simulation 3D de l'étalement de poudre (vidéo)	77
3.1	Subdivision de la zone du lit de poudre	84
3.2	Coefficient de frottements	85
3.3	Énergie d'adhésion	86
3.4	Effet de l'adhésion (vidéo)	86
	(a) Pas d'adhésion, $\gamma = 0 mJ/m^2$ (Vue de dessus)	86
	(b) Pas d'adhésion, $\gamma = 0 mJ/m^2$ (Vue de côté)	86
	(c) Poudre très adhésive, $\gamma = 5 mJ/m^2$ (Vue de dessus)	86
	(d) Poudre très adhésive, $\gamma = 5 mJ/m^2$ (Vue de côté)	86
3.5	Cône de Hall utilisé pour comparer les modèles d'adhésion	88
3.6	Forces de Van der Waals pour $\mu = 50 \mu m$ et $70 \mu m$ (vidéo)	88
3.7	Avec/sans modèle aqueux $\mu = 70 \mu m$ (vidéo)	89
3.8	Échantillons réels ($R_{asp} = 5 nm$) (vidéo)	90
3.9	Tambour tournant expérimental	92
	(a) Profil en S à 40 RPM	92
	(b) Trois pentes	92
3.10	Évolution des angles en fonction de la vitesse de rotation	93
3.11	Vitesses à la paroi : 8 mm/s, 105 mm/s, 230 mm/s (vidéo)	94

3.12	Cône de Hall	96
	(a) Poudre ayant traversé le cône	96
	(b) Schéma	96
3.13	Simulation de l'écoulement de poudre à travers le cône de Hall pour différentes valeurs d'adhésion (vidéo)	98
3.14	Comparaison simulation/essai expérimental de l'angle de talus [73] . .	99
3.15	Simulation d'angle de talus (vidéo)	100
	(a) $\gamma = 1 \text{ mJ/m}^2$, angle = 21°	100
	(b) $\gamma = 2 \text{ mJ/m}^2$, angle = 26°	100
	(c) $\gamma = 4 \text{ mJ/m}^2$, angle = 32°	100
	(d) $\gamma = 8 \text{ mJ/m}^2$, angle = ∞	100
3.16	Influence de l'adhésion sur l'angle de talus	100
3.17	Conditions périodiques d'axisymétrie	102
3.18	Différents angles de simulation (vue de dessus)	103
	(a) Angle de talus complet	103
	(b) 90°	103
	(c) 45°	103
3.19	Différents angles de simulation (vidéo)	103
	(a) Angle de talus complet	103
	(b) 90°	103
	(c) 45°	103
3.20	Différents angles de simulation (vue de côté)	104
	(a) Angle de talus complet	104
	(b) 90°	104
	(c) 45°	104
3.21	Diamètre = 4 mm de diamètre, angle de la section = 45°	105
	(a) $\gamma = 3 \text{ mJ/m}^2$	105
	(b) $\gamma = 5 \text{ mJ/m}^2$	105
3.22	Vue de dessus d'un cas avec un angle petit	105
3.23	Échantillon de Ti6Al4V de $d_{50} = 72 \mu\text{m}$	106
	(a) 4 mJ/m^2	106

(b)	6 mJ/m^2	106
(c)	8 mJ/m^2	106
(d)	10 mJ/m^2	106
3.24	Échantillon similaire à celui étudié par Meier [73]	106
3.25	Conditions périodiques rectilignes	108
3.26	Schéma de la surface de calcul	109
(a)	Conditions périodiques d'axisymétrie	109
(b)	Conditions axi-périodiques rectilignes	109
3.27	Application des conditions périodiques aux vecteurs	109
3.28	Angle critique	111
3.29	Effet de l'adhésion avec les conditions axi-périodiques rectilignes . . .	112
(a)	1 mJ/m^2	112
(b)	3 mJ/m^2	112
(c)	5 mJ/m^2 (vidéo)	112
4.1	Vitesse du racleur	118
4.2	Milieu granulaire dense grâce aux petites particules	119
4.3	Effet de l'écart-type de la distribution granulométrique sur l'étalement	119
4.4	Analyse d'image du lit de poudre	121
(a)	Taux de pixels non blancs : 50.2%	121
(b)	Taux de pixels non blancs : 99.9%	121
4.5	Profilométrie numérique d'un lit de poudre simulé (échelle de couleur en bas)	122
4.6	Température initiale à la surface du lit de poudre	124
4.7	Température initiale dans le plateau	125
4.8	Solution choisie (vidéo)	125
4.9	Évolution de la température en fonction du temps	127
4.10	Évolution de la densité de pixels en fonction du paramètre réduit E/μ	128
4.11	Évolution de $\frac{1}{t_{1/2}}$ en fonction du paramètre réduit E/μ	128
4.12	Densité de pixels	130
4.13	Effet de la rugosité	130

4.14	Analyse par densité de pixels	131
4.15	Calcul de la diffusivité	132
4.16	Analyse par densité de pixels	133
4.17	Calcul de la diffusivité	134
4.18	Analyse par densité de pixels	135
4.19	Calcul de la diffusivité	135
4.20	E/μ limite lorsque la densité de pixels est inférieure à 50%	136
4.21	E/μ limite lorsque $t_{1/2}$ est infini	137
4.22	Essai angle de talus	141
4.23	Simulation d'un étalement sur une zone de poudre et une zone fusion- née (vidéo)	141
4.24	Simulation du passage du laser sur un lit de poudre réel [111]	142
A.1	Cylindre de \varnothing 5 cm (à gauche) et 1 cm (à droite)	154
A.2	Cylindre sur support ($\varnothing = 5$ cm)	155
A.3	Distribution des tailles de particules des échantillons étudiés	156
A.4	Mesure de l'angle	157
A.5	Angle de talus pour un échantillon de Rene77 (10-53 μm)	158
A.6	Angle de talus obtenu avec le cône de Carney	159
A.7	Effet de la vitesse d'écoulement	160
A.8	Angle de talus obtenu avec le cône de Hall	161
A.9	Effet de la vitesse d'écoulement	162
A.10	Manipulation	163
A.11	Angle de talus	163
A.12	Angle de talus	164
A.13	Angle de talus	164
A.14	Tas de poudre	166
	(a) 28-54 μm	166
	(b) 15-45 μm	166
	(c) 45-75 μm	166

Liste des tableaux

2.1	Comparaison des performances entre la méthode LCM et la méthode HGrid sur un même échantillon	74
2.2	Déciles d'un échantillon d'inconel 718	77
2.3	Paramètres procédé	77
3.1	Essais de coulabilité réalisés par Rémi Giraud	97
3.2	Réduction du temps de calcul	104
4.1	Valeurs des paramètres procédé utilisées par défaut	117
A.1	Récapitulatif des mesures	165
A.2	Récapitulatif des mesures	166

Introduction

Depuis quelques années, la fabrication additive ou impression 3D se développe de plus en plus et cette avancée technologique permet d’imaginer la production de pièces toujours plus complexes pour des applications de plus en plus diverses. Le procédé de fusion de lit de poudre par laser, étudié dans ce travail, est l’un des procédés de fabrication additive de pièces métalliques les plus utilisés. La demande industrielle en augmentation nécessite la possibilité de produire plus de pièces, plus rapidement avec un coût de production réduit. Il est alors primordial de maîtriser les différents phénomènes intervenant dans ce procédé afin d’optimiser les jeux de paramètres utilisés pour produire les pièces sans défauts.

Le procédé LBM (Laser Beam Melting) consiste à fabriquer une pièce par additions de couches de matière. Une couche de poudre métallique est étalée sur la zone de fabrication puis un laser vient fusionner les grains de poudre grâce à l’augmentation de température et la formation d’un bain liquide qu’il engendre. Une fois le laser passé, la température diminue et la matière se solidifie. Le laser suit une trajectoire définie par la machine pour créer la première couche de matière solide correspondant à une section de la pièce. La machine recommence ce processus en étalant une nouvelle couche de poudre par-dessus la couche précédente. Chaque couche de matière est très fine ($\sim 60 \mu m$) donc un nombre important de couches est nécessaire pour produire la pièce finale.

Cette thèse, réalisée en collaboration entre Safran et l’I2M Bordeaux, fait partie d’un projet de trois thèses menées en parallèle par Safran (figure 1). Projet faisant lui-même partie de la plateforme de collaboration AFH (Additive Factory Hub) sur la fabrication additive. Ce réseau permet de regrouper plusieurs entreprises, laboratoires et organismes de la région Île-de-France. Parmi ceux-ci, on retrouve AddUP, Air Liquide, EDF, le LNE, l’ONERA, Safran, Vallourec, le CETIM, le CEA, les Arts et Métiers et le CNRS.



FIGURE 1 – Trois thèses Safran sur le procédé LBM dans le cadre AFH

L'objectif de ce travail est de développer un modèle numérique pour simuler la phase d'étalement de poudre du procédé LBM et comprendre l'influence des paramètres procédé afin d'assurer une bonne qualité du lit de poudre et de réduire les temps de fabrication. En effet, le résultat du passage du laser et la qualité de la pièce finale sont liés en partie à la qualité du lit de poudre.

Pour présenter le travail réalisé, le manuscrit de thèse s'organise en quatre chapitres :

- Le premier chapitre consiste à présenter la fabrication additive en général puis plus en particulier le procédé de fusion laser de lit de poudre qui est celui dont il est question dans cette étude. Puis, sont présentés les verrous technologiques à lever pour arriver à une meilleure maîtrise du procédé et réduire les coûts et le temps de fabrication. Les caractéristiques des poudres utilisées dans ce type de procédé sont également présentées pour comprendre comment modéliser la

poudre. L'intérêt de ce travail étant de simuler le comportement de la poudre, les diverses méthodes de simulation de milieux granulaires sont présentées. Enfin, une étude de l'état de l'art sur ce sujet est présentée pour comprendre quels sont les verrous scientifiques qu'il reste à lever.

- Le chapitre 2 a pour but de présenter le modèle numérique développé pour réaliser la simulation de l'étalement de poudre. Cela commence par la présentation de la méthode numérique employée ainsi que de la modélisation des éléments qui entrent en jeu dans le procédé tels que la poudre ou le racleur. Le modèle de comportement est ensuite décrit en détaillant les forces d'interactions prises en compte ainsi que les valeurs des paramètres numériques.
- Le chapitre 3 se concentre sur les paramètres matériaux du modèle numérique mis en place. Il faut trouver un moyen d'identifier la valeur de ces paramètres. Pour commencer, une étude préliminaire est présentée pour analyser l'effet de ces matériaux sur le lit de poudre final. Ensuite, l'utilisation d'un modèle analytique est envisagée et étudiée. Les conclusions issues de cette analyse mènent finalement à l'étude d'essais expérimentaux et à leur simulation pour caractériser les paramètres matériaux à partir du comportement global d'un échantillon de poudre.
- Le dernier chapitre vise à utiliser la simulation développée pour comprendre l'impact de différents paramètres procédé sur la qualité de l'étalement. Pour cela, des méthodes de caractérisation numérique de la qualité du lit de poudre obtenu sont développées pour faciliter l'analyse d'études paramétriques.

La version numérique de ce manuscrit contient des liens vers des vidéos de simulations pour illustrer le propos. Le visionnage des vidéos n'est cependant pas nécessaire à la compréhension. Pour la version papier de ce manuscrit, il est possible d'accéder à la playlist contenant chacune des vidéos à l'adresse suivante : https://youtube.com/playlist?list=PLoGtzTgNW8Ii_HxgcE8t1G5a8asVS0onQ.

Chapitre 1

Contexte et enjeux

Résumé

La fabrication additive, ou impression 3D, est un nouveau type de procédé de fabrication. Alors que tous ses aspects ne sont pas encore bien maîtrisés, ses nombreux avantages en font une technologie en plein développement qui prend de plus en plus de place au sein des différents secteurs industriels. Dans ce chapitre, un historique de la fabrication additive est donné pour comprendre comment cette famille de procédé s'est développée, avec une attention particulière au procédé de fusion laser de lit de poudre métallique puisque c'est de ce procédé dont il est question dans le manuscrit. Le but étant de développer un modèle numérique capable de simuler le comportement d'une poudre métallique lors de l'étalement, il faut être en mesure d'alimenter le modèle numérique avec les caractéristiques réelles de la poudre. En effet, l'étalement de la poudre est une étape critique pour le bon déroulement du procédé puisque la qualité du lit de poudre impacte directement la qualité de la fusion laser et de la pièce. Pour cela, une présentation est donnée de la poudre en elle-même, des procédés de mise en œuvre ainsi que des moyens de caractérisation de celle-ci. Puis, différentes méthodes numériques permettant de modéliser un milieu granulaire seront décrites. Enfin, un état de l'art sur la simulation de l'étalement de poudre dans le procédé LBM sera présenté.

Sommaire

1.1	Fabrication additive	8
1.1.1	Historique	8
1.1.2	Principe de fonctionnement	9
1.1.3	Intérêts de la fabrication additive	9
1.2	Procédés de fabrication additive à base de poudre	14
1.2.1	Fabrication additive lit de poudre	14
1.2.1.1	Procédé de fusion laser sur lit de poudre métallique	14
1.2.1.2	Electron Beam Melting	19
1.2.1.3	Selective Laser Sintering	19
1.2.1.4	Projection de liant	19
1.2.2	Fabrication additive directe	20
1.2.2.1	Directed Energy Deposition	20
1.2.2.2	Procédés dérivés du DED	21
1.3	Verrous technologiques	22
1.4	Poudre métallique et caractérisation	25
1.4.1	Poudres pour le procédé LBM	25
1.4.1.1	Inconel 718	26
1.4.1.2	TA6V	26
1.4.2	Atomisation des poudres	26
1.4.3	Caractérisation des poudres	28
1.4.3.1	Granulométrie	28
1.4.3.2	Morphologie	29
1.4.3.3	Coulabilité	30
1.4.3.4	Cohésion	31
1.4.3.5	Essais de caractérisation	32
1.4.3.6	Essais expérimentaux de l'étalabilité de la poudre	36
1.5	Simulation de milieux granulaires	37
1.5.1	Domaines d'applications	37
1.5.2	Méthodes particulières	38
1.5.2.1	Molecular Dynamics	38
1.5.2.2	Méthode des éléments discrets	38
1.5.2.3	Non-Smooth Contact Dynamics	39
1.5.3	Méthodes non-particulières	40
1.5.3.1	Smoothed Particle Hydrodynamics	40

1.5.3.2	CFD	40
1.6	Simulation numérique de l'étalement de poudre	41
1.6.1	Modélisation du procédé	41
1.6.2	Principaux résultats de l'étude bibliographique	47
1.7	Verrous scientifiques	51

1.1 Fabrication additive

La fabrication additive ou impression 3D désigne un ensemble de techniques de fabrication de pièces par addition de couches de matière successives. La principale différence par rapport aux procédés traditionnels (comme l'usinage par exemple), est qu'ici il ne s'agit pas d'enlever de la matière pour obtenir la pièce souhaitée, il faut en ajouter.

Ce type de procédé est plutôt récent, apparu dans les années 80 mais en plein essor aujourd'hui grâce aux nombreux avantages qu'il apporte parmi lesquels l'économie de matière, la possibilité de créer des formes complexes ou encore la réduction de la masse des pièces que cela entraîne.

1.1.1 Historique

Avec la démocratisation des modèles numériques 3D conçus par ordinateur (CAO) vers la fin des années 70, apparaît rapidement le rêve de pouvoir transformer ces modèles virtuels en objet réels.

Les premiers brevets portant sur la fabrication additive sont déposés en 1984 par trois français : Alain Le Méhauté, Olivier de Witte et Jean-Claude André pour CILAS Alcatel [1] puis par l'américain Chuck Hull [2] qui créera en 1986 la société 3D Systems. L'objectif du développement de ce nouveau type de procédé est d'abord de permettre d'élaborer rapidement des prototypes de pièces (prototypage rapide) en respectant la forme géométrique sans nécessairement avoir les propriétés mécaniques demandées. Ces deux brevets concernent la stéréolithographie ou SLA (stereolithography apparatus). Ce procédé consiste à faire polymériser une résine sensible aux rayons UV par photopolymérisation grâce à l'application d'un faisceau laser.

L'impression 3D est aujourd'hui connue par le grand public principalement grâce aux machines de dépôt de fil fondu qui sont les plus accessibles. Le dépôt de fil fondu (DFF), aussi appelé Fused Deposition Modeling (FDM) ou Fused Filament Fabrication (FFF), consiste à fabriquer une pièce couche par couche en déposant un filament de matière polymère. Les matériaux utilisés le plus couramment sont le PLA et l'ABS.

Cependant, il existe d'autres procédés de fabrication additive pour d'autres types de matériaux comme les céramiques [3] ou les métaux. Le travail présenté ici s'intéresse à la fabrication additive de pièces métalliques qui offrent des propriétés thermiques et mécaniques très intéressantes pour diverses applications industrielles

comme dans l'aéronautique et l'aérospatiale par exemple où des pièces de moteurs notamment sont imprimées en 3D afin de profiter de la réduction de masse et de la réduction des assemblages grâce à la possibilité de former des géométries complexes et ainsi réduire les risques de défaillances [4].

1.1.2 Principe de fonctionnement

Pour produire une pièce par fabrication additive, un modèle numérique de la pièce est conçu par CAO (Conception Assistée par Ordinateur) et exporté dans un format de fichier adapté aux machines de fabrication additive. Le format le plus courant est le STL apparu pour la stéréolithographie mais également utilisé depuis pour les autres procédés. Il s'agit d'un type de fichier contenant les informations sur la géométrie de l'objet à fabriquer.

Le programme informatique de la machine analyse le fichier contenant le modèle numérique de la pièce pour établir une stratégie de fabrication suivant la technique utilisée. Il peut être nécessaire de mettre en place des supports qui seront fabriqués avec la pièce mais qui ne feront pas partie de la pièce finale. L'intérêt des supports est d'éviter des déformations de la pièce au cours de la fabrication et de pouvoir détacher la pièce du plateau de fabrication plus facilement. Cependant, ils sont difficiles à enlever et de post-traitements supplémentaires sont nécessaires tels que l'usinage et le traitement de surface.

Lorsque la fabrication est terminée, un traitement thermique est réalisé pour relâcher les contraintes, puis la pièce et les supports sont découpés du plateau de fabrication via découpe fil. Selon le procédé utilisé et le niveau de qualité attendu, des finitions peuvent être apportées afin d'améliorer la qualité de surface de la pièce par exemple.

1.1.3 Intérêts de la fabrication additive

La fabrication additive est un type de procédé qui intéresse de plus en plus de secteurs industriels avec notamment l'aéronautique, l'aérospatial et l'automobile pour la réduction du poids des pièces et la réduction des assemblages.

Cette technologie apporte de nombreux avantages. Ce type de procédé permet de produire des pièces plus légères grâce à l'optimisation topologique apparue récemment. En effet, il est possible de concevoir des pièces ayant les mêmes fonctions que celles produites par des procédés traditionnels tout en réduisant la quantité de matière dans les zones de la pièce les moins sollicitées mécaniquement. Cela permet

donc de réduire la masse de la pièce tout en maintenant ses propriétés mécaniques. La pièce optimisée peut avoir une forme géométrique complexe (Figure 1.1) mais la fabrication additive est bien adaptée à la réalisation de telles géométries. Ce procédé donne même la possibilité d'ajouter des fonctions à l'intérieur de la pièce (canaux), ce qui n'est pas réalisable avec d'autres procédés. La facilité à produire des pièces de formes complexes permet également de réduire les assemblages de pièces afin de garantir une meilleure fiabilité. La réduction de la masse est particulièrement nécessaire pour l'aéronautique afin de réduire la consommation énergétique.

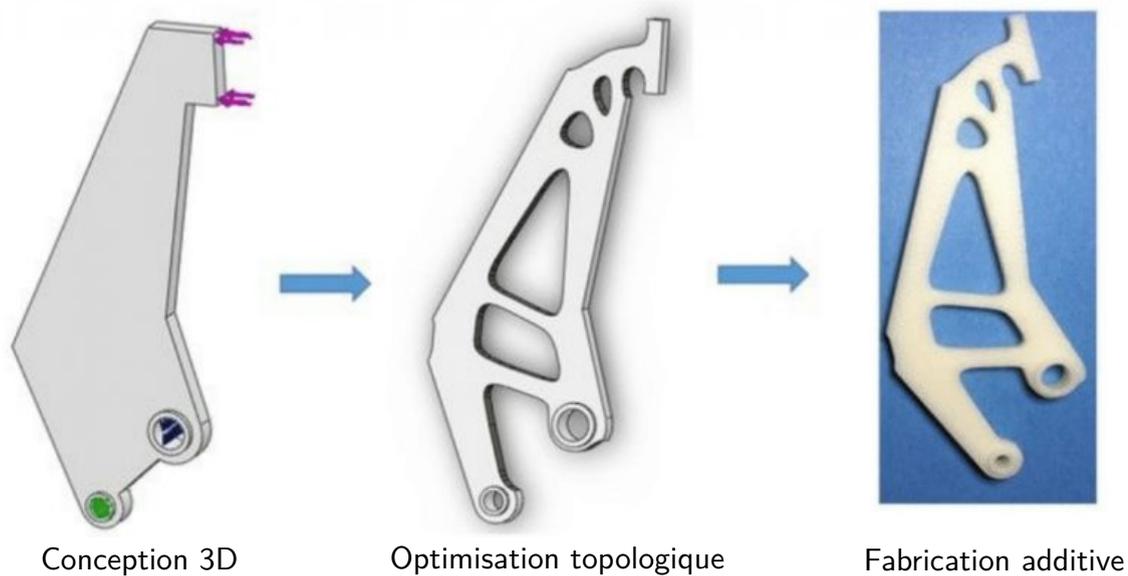


FIGURE 1.1 – Optimisation topologique d'une pièce [5]

Les procédés par addition de matière permettent également un coût de production plus bas car contrairement à l'usinage (soustraction de matière), il y a très peu de perte de matière, ce qui apporte une différence importante pour les matériaux coûteux comme les alliages de titane et de nickel notamment. En effet, la poudre non fondue utilisée pour la fabrication peut être recyclée quelques fois. En revanche la fabrication des supports constitue une perte de matière.

Cependant, ce type de procédé a quelques inconvénients puisque l'utilisation de poudres métalliques peut présenter des risques pour la santé et la sécurité. Certaines poudres sont réactives avec l'oxygène présent dans l'air (titane, aluminium) et présentent un risque incendie. Elles doivent être manipulées avec précautions et un équipement adapté. La très faible taille des particules rend l'inhalation ou le contact de la poudre avec la peau possible et dangereuse pour la santé. D'autre

part, la poudre métallique est extrêmement chère du fait des faibles rendements des atomiseurs pour les granulométries recherchées. La taille des pièces fabriquées par impression 3D est limitée au volume disponible dans la zone de fabrication des machines. Une des machines avec le plus grand volume de fabrication actuellement est la Concept Laser X line 2000R avec un volume de $800 \times 400 \times 500$ mm. Pour le moment, la production de pièces ne peut se faire qu'en petites séries même si les constructeurs travaillent sur des machines plus grandes avec plusieurs lasers. De plus, ces procédés ne sont pas encore bien maîtrisés et des défauts peuvent apparaître dans les pièces fabriquées ce qui dégrade la durabilité et les propriétés de celles-ci. Enfin l'état de surface de la pièce finale peut avoir un effet important puisque le fait de construire la pièce couche par couche implique un effet escalier qui génère une rugosité de surface.

Exemples d'applications de la fabrication additive dans divers secteurs industriels : L'impression 3D permet d'abord de faire du prototypage rapide avec notamment des pièces réalisées en matériaux polymères dans les phases de conception où il n'est pas nécessaire d'avoir de bonnes propriétés mécaniques.

Même si la fabrication additive a mis du temps à arriver dans le secteur aéronautique en raison de la nouveauté de la technologie et d'importantes normes de sécurité, elle reste très intéressante vu les avantages qu'elle apporte, notamment la réduction de la masse, et est donc beaucoup étudiée. Chez Safran, la fabrication additive est utilisée dans de plus en plus de cas. Les turbomoteurs Arrano et Ardiden 3 (hélicoptères) sont composés d'injecteurs de carburant et de tourbillonneurs de chambres de combustion . Ces pièces sont fabriquées par fusion laser de lit de poudre. Le turboréacteur LEAP est également équipé d'injecteurs de carburant imprimés en 3D (Figure 1.2). Le générateur auxiliaire de puissance (APU) Saphir 4.2 est majoritairement composé de pièces fabriquées par fusion laser. Le Boeing 777X et l'Airbus A350 XWB sont composés respectivement de plus de 600 et plus de 1000 pièces produites par impression 3D [6].



(a) Injecteur de carburant LEAP



(b) Moteur LEAP

FIGURE 1.2 – Moteur LEAP qui embarque des pièces imprimées par LBM

Depuis peu, ArianeGroup multiplie les essais à feu d'un démonstrateur à l'échelle 1 : 1 de tête d'injection de chambre de combustion (ETID) réalisée par impression 3D en cuivre et inconel 718 [7]. Ces essais permettront de valider les nouvelles technologies de fabrication pour les futurs moteurs des deuxièmes étages de lanceurs spatiaux ainsi que pour le moteur réutilisable Prometheus qui doit permettre de diviser par 10 le coût de production par rapport au moteur Vulcain en grande partie grâce à la fabrication additive qui devrait fournir 50% des pièces. L'impression 3D permet dans ce cas de réaliser des formes bien plus complexes qui impliquent une amélioration des performances comme des canaux de refroidissement par exemple qui peuvent être réalisés par usinage mais qui nécessite de boucher les trous laissés par l'opération avec du soudage. Le nombre de pièces à assembler pour former la pièce finale est drastiquement réduit, ce qui implique des temps de cycle de fabrication réduits avec une gamme de fabrication plus simple et avec moins d'étapes ainsi que des coûts réduits. SpaceX utilise également la fabrication additive pour ses véhicules, le lanceur Falcon 9 est constitué de pièces imprimées en 3D depuis 2014 et le moteur SuperDraco qui équipe les capsules Dragon de SpaceX est constitué d'une chambre de combustion fabriquée par fusion laser d'Inconel (twitter Elon Musk). Cette technologie permet notamment de réduire considérablement le temps de mise en œuvre par rapport aux pièces moulées et offre des propriétés matériaux plus performantes et plus homogènes selon le dirigeant de SpaceX [8].

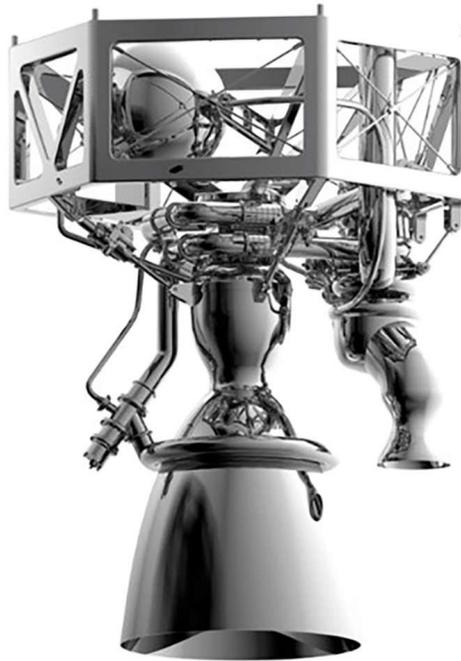


FIGURE 1.3 – Moteur Prometheus

Dans le secteur de l'automobile et plus particulièrement en Formule 1 où la compétitivité pousse les ingénieurs à développer des engins toujours plus performants et dont les avancées technologiques se retrouvent quelques années plus tard dans les voitures de tous les jours, la fabrication additive est de plus en plus employée [9].

Le développement de ces nouvelles technologies de fabrication a donné des idées à l'ESA qui étudie la possibilité de fabriquer des pièces directement à partir de régolithe lunaire, la poussière qui recouvre la surface lunaire. En effet, un matériau ayant les mêmes propriétés que le régolithe lunaire a été développé et des pièces ont déjà été fabriquées. Le procédé utilisé est similaire à la stéréolithographie [10]. De plus, le DLR (agence aérospatiale allemande) a réussi à construire une brique de régolithe synthétique grâce à la cuisson dans un four solaire pour lier les grains entre eux. Ainsi, la matière première et la source d'énergie seraient disponibles sur place pour effectuer des réparations voire construire des pièces de tailles trop importantes pour être amenées depuis la Terre.

Enfin, l'impression 3D est également utilisée dans le secteur médical pour la fabrication d'implants dentaires, chirurgicaux et de prothèses car cela permet de faire des pièces sur mesure et unitaires.

1.2 Procédés de fabrication additive à base de poudre

Parmi les procédés de fabrication additive, il existe une grande famille de procédé utilisant de la poudre comme matière première. L'intérêt d'utiliser de la poudre dans ces procédés consiste à tirer profit du fait qu'un milieu granulaire se comporte à la fois comme un solide et comme un fluide. En effet, le comportement proche d'un fluide permet de disposer ou modeler la matière facilement en injectant ou étalant de la poudre alors que le comportement solide permet de nettoyer facilement la pièce fabriquée en enlevant la poudre non fusionnée par exemple pour les technologies à base de lit de poudre.

1.2.1 Fabrication additive lit de poudre

Il existe plusieurs procédés de fabrication additive basés sur l'utilisation d'un lit de poudre. Cela consiste, pour chaque couche de matière, à étaler une couche de poudre puis de transformer certaines zones de celui-ci avec des moyens qui diffèrent selon le procédé. Une fois la fabrication terminée, la poudre non-fusionnée est retirée (et réutilisée) et il ne reste plus que la pièce fabriquée.

1.2.1.1 Procédé de fusion laser sur lit de poudre métallique

Le procédé Laser Beam Melting (LBM), ou fusion par faisceau laser en français, encore appelé Laser Powder Bed Fusion (LPBF) ou Selective Laser Melting (SLM), est un procédé de fabrication additive de pièces métalliques. Comme son nom l'indique, il consiste à faire fusionner par l'intermédiaire d'un faisceau laser les zones devant être solidifiées d'un lit de poudre précédemment déposé. L'addition de couches de matière les unes par-dessus les autres permet de former la pièce finale. Il permet notamment de fabriquer des pièces en alliage de titane (TA6V par exemple), en alliage de nickel (Inconel IN718 par exemple) ou encore en alliage d'acier inoxydable (316L).

Pour l'élaboration de chaque couche, deux phases sont nécessaires (le schéma de la Figure 1.4 représente le fonctionnement d'une machine LBM) :

- La première consiste à étaler un lit de poudre métallique sur la zone de fabrication afin de la faire fusionner par la suite. Pour cela, un système de dépôt récupère la poudre depuis la zone d'alimentation où la poudre peut être stockée ou apportée au fur et à mesure selon les machines. Puis il l'étale sur la zone de fabrication, par-dessus la couche précédente.

- La deuxième phase consiste à faire fusionner les zones de poudres, correspondant aux sections de la pièce, sélectionnées par la machine en fonction du modèle 3D de la pièce pour former la couche de matière solide après solidification du bain en fusion. Afin de traiter toute la zone à fusionner, la machine élabore un chemin que le laser doit suivre grâce au fichier STL fourni à la machine contenant les informations nécessaires à la production de la pièce. Lorsque le laser suit ce chemin, la zone de poudre qui absorbe la puissance du laser se met à fondre. La zone d'action du laser est très localisée (diamètre du faisceau = $100\ \mu\text{m}$ voire plus petit) et la solidification de la matière intervient très rapidement pour former au fur et à mesure un cordon de matière solide. La couche ainsi créée est alors constituée de plusieurs cordons liés lors de la solidification. La pièce finale est enfin obtenue par additions successives de couches.

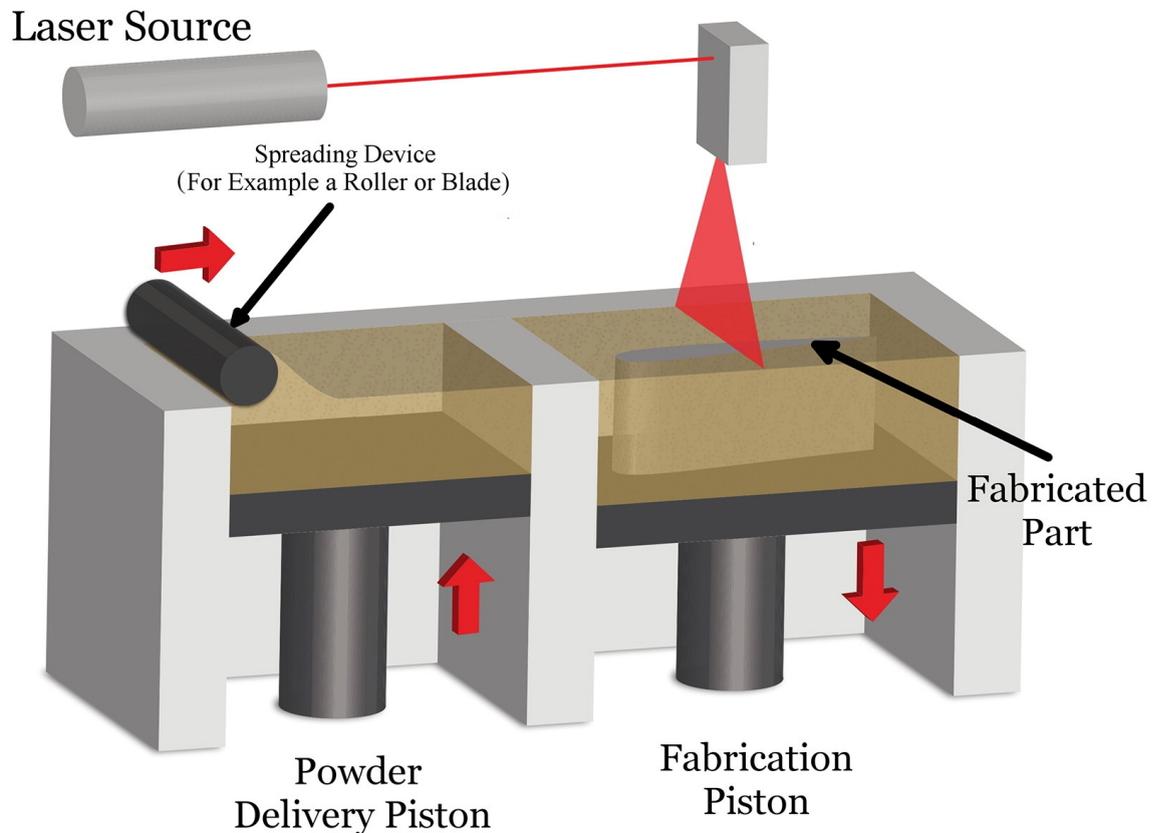


FIGURE 1.4 – Schéma du procédé LBM [11]

Système d'alimentation : Suivant les machines utilisées, l'alimentation en poudre pour une couche à étaler peut être réalisée différemment. Comme dans le cas du schéma de la figure 1.4, la poudre peut être stockée dans un bac qui peut s'élever à l'aide d'un piston à la hauteur nécessaire pour fournir au racleur la quantité de

poudre nécessaire. Cette quantité est déterminée en fonction du volume de poudre à étaler (épaisseur de la couche multipliée par la surface de la zone de fabrication) et du paramètre de dosage qui permet généralement d'étaler un peu plus de poudre que nécessaire pour éviter d'éventuels manques de matière. D'autres machines utilisent un système qui laisse tomber la quantité de poudre nécessaire devant le racleur. Enfin, il existe également des machines dont l'alimentation en poudre se fait directement dans le système du racleur.

Racleur : Selon les machines, différents systèmes de mise en couche sont utilisés. Ils peuvent être rigides ou souples (en silicone ou caoutchouc). Différentes géométries existent : des lames, des rouleaux ou des brosses.

Phase de fusion laser : Lors de la phase de fusion du lit de poudre, un système de miroirs permet de diriger le laser pour fusionner la poudre sur les zones sélectionnées par la machine pour former la couche de matière solide. Lorsque le laser est appliqué sur le lit de poudre, il chauffe les grains jusqu'à la température de fusion pour les transformer en un bain liquide de métal. Puis ce métal en fusion se solidifie une fois que le faisceau laser n'est plus au contact de la zone visée.

Machines industrielles : Parmi les fabricants les plus populaires de machines industrielles de fabrication additive, on retrouve notamment SLM Solutions, Renishaw, EOS, 3D Systems, AddUp. Il existe différents formats de machines selon la géométrie de la pièce à fabriquer. Certaines machines utilisent plusieurs lasers pour réduire le temps de la phase de fusion laser. Le volume disponible pour la construction est une des principales différences entre les modèles des machines. SLM Solutions propose des modèles dont les dimensions de constructions varient de 125x125x125mm à 500x280x800mm. Renishaw propose des machines avec un volume disponible de 250x250x350mm. Un dernier exemple, la machine de chez EOS avec le plus grand volume de construction est un cube de 400x400x400mm. La figure 1.5 montre une machine industrielle de fabrication additive par fusion laser du fabricant SLM Solutions. Il s'agit d'un système fermé. La porte vitrée permet d'observer la fabrication en cours et de sortir la pièce une fois celle-ci terminée. Il y a également un écran de commande pour gérer les paramètres du procédé.



FIGURE 1.5 – Exemple de machine LBM (SLM Solutions)

Paramètres procédé : Comme pour beaucoup de procédés de fabrication, il existe un nombre important de paramètres qu'il est possible de modifier pour fabriquer une pièce en fonction de la qualité de la pièce souhaitée ou encore en fonction du temps de fabrication. En effet, l'épaisseur de couche utilisée impacte directement la qualité finale de la pièce et le temps de fabrication. Plus l'épaisseur de couche est importante, moins il faudra de couches de matières pour produire la pièce finale. Cependant, des essais de fabrication de cubes réalisés chez Safran montrent que plus l'épaisseur est élevée, plus les cubes sont poreux. Il faut déterminer l'épaisseur de couche étalée. Selon la machine utilisée, le racleur est différent, il peut être souple ou rigide et il peut avoir différentes géométries. Sa vitesse est également un paramètre important puisqu'elle influe sur la qualité du lit de poudre et le temps de fabrication. Il faut également définir le paramètre de dosage. Cela correspond à la quantité de poudre qui est récupérée par le racleur pour l'étaler par rapport à l'épaisseur de poudre à étaler. En effet, généralement ce paramètre est supérieur à 100% afin d'être sûr d'avoir toujours assez de poudre notamment en fin de course. D'autres paramètres doivent être gérés concernant la phase d'action du laser à commencer par le laser en lui-même. Il est possible de faire varier la puissance du laser, la vitesse de balayage ainsi que le diamètre du faisceau. Un autre paramètre nommé écart-vecteur correspond à l'espace entre deux cordons de matières créés par le passage du

laser. Généralement l'écart-vecteur est choisi tel qu'il y ait un recouvrement entre les cordons de manière à diminuer la rugosité de surface. Enfin, il est possible de déterminer une stratégie de trajectoire du laser pour la fabrication de la pièce. Si la pièce à fabriquer doit présenter un état de surface peu rugueux, il peut être choisi d'opter pour une stratégie qui consiste à fusionner d'abord le contour de la couche avec des paramètres choisis pour que l'état de surface soit "propre" puis de fusionner l'intérieur avec d'autres paramètres qui agiront plus grossièrement et une vitesse plus importante ce qui permettra de diminuer le temps nécessaire à la fabrication de la pièce.

La phase d'étalement de la poudre a un impact important sur le temps de fabrication de la pièce. En effet, l'étalement d'une couche de poudre est d'environ 8 à 10 secondes alors que la phase de fusion laser est plutôt rapide (vitesse de balayage $\sim 1\text{ m/s}$). Pour diminuer le temps de fabrication, il faudrait soit augmenter la vitesse d'étalement afin d'accélérer l'étalement de chaque couche soit augmenter l'épaisseur de couche afin de réduire le nombre de couches à étaler. Il faut cependant être conscient qu'une vitesse de racleur élevée peut former un lit de poudre de moins bonne qualité risquant la formation de défauts dans la pièce finale. Une épaisseur de couche plus grande résultera en une rugosité de surface plus importante à cause de l'effet escalier ainsi que des problèmes lors de l'interaction laser-matière comme des zones non fusionnées. L'effet escalier est illustré sur la figure 1.6 et montre que la résolution est meilleure lorsque l'épaisseur de couche est plus fine, ainsi l'état de surface est plus lisse.

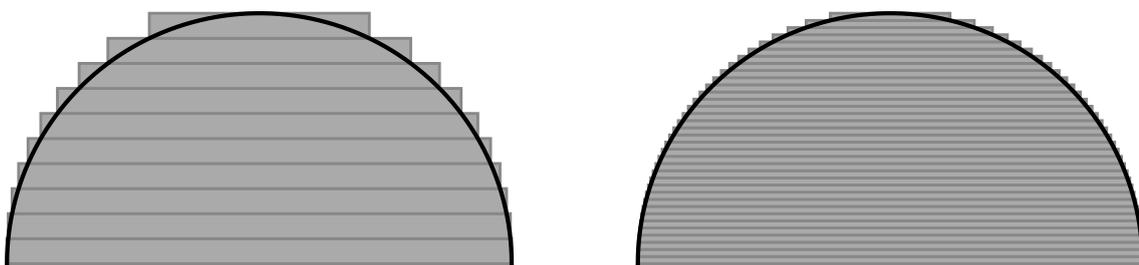


FIGURE 1.6 – Résolution de la pièce : grossière à gauche, fine à droite

La fabrication d'une pièce demande une quantité de poudre importante puisque cela revient à remplir la zone de fabrication dans les trois dimensions. Par exemple, la fabrication d'une pièce de 350 mm de haut dans une machine SLM 280 dont la surface du plateau fait $280 \times 280\text{mm}^2$ demande l'utilisation de près de 30 L de poudre. L'avantage est que la poudre non fusionnée peut être récupérée pour un certain nombre de cycles et servir à d'autres fabrications.

1.2.1.2 Electron Beam Melting

Le procédé Electron Beam Melting (EBM), ou procédé ARCAM développé par la société suédoise ARCAM, est semblable au procédé LBM. En effet, il s'agit également de transformer un lit de poudre métallique sauf que c'est un faisceau d'électrons qui est utilisé à la place d'un laser. En revanche, ici un pré-frittage est nécessaire afin d'assurer une meilleure conduction thermique et électrique entre les particules ainsi qu'un meilleur maintien mécanique avant que le faisceau d'électrons parcourt les zones sélectionnées pour faire fondre la matière. Pour préchauffer le lit de poudre, un faisceau bien plus large est utilisé et est balayé sur toute la surface de la zone de fabrication. Ce procédé permet d'obtenir des pièces avec de très bonnes propriétés mécaniques, en revanche sa mise en œuvre nécessite de travailler sous vide en raison de l'utilisation d'un faisceau à base d'électrons sur des poudres conductrices. Il est principalement utilisé avec des poudres d'alliages de titane.

Une autre différence avec le procédé LBM est que les particules utilisées ont généralement une taille supérieure à ce qui est utilisé en fusion laser. Ainsi, l'épaisseur de couche est généralement plus importante, ce qui implique un temps de fabrication plus court puisqu'il y a moins de couches de matière à produire mais cela augmente la rugosité de surface puisque la résolution des pièces est affectée par l'épaisseur de couche.

1.2.1.3 Selective Laser Sintering

Le procédé Selective Laser Sintering (SLS) est également proche du procédé LBM puisqu'il utilise un lit de poudre et un laser mais ici il n'est pas question de fusionner la poudre mais de la fritter. La fusion consiste à faire chauffer la poudre pour la faire passer à l'état liquide, cela permet ensuite au liquide de se mélanger et lorsqu'il refroidit, cela forme la matière solide liée. Le frittage consiste à chauffer la poudre sans atteindre le point de fusion de la matière. Les grains se soudent entre eux sous l'effet de la chaleur sans passer par la phase liquide. Le procédé SLS est utilisé principalement pour des poudres de matériaux polymères.

1.2.1.4 Projection de liant

Un procédé de projection de liant sur une couche de poudre permet de former des couches de matière solides pour fabriquer des pièces couche par couche. Ce procédé peut être nommé Binder Jetting, traduction de projection de liant. Une fine couche de poudre est déposée sur le plateau de fabrication puis la tête d'impression projette

le liant sur la poudre. Ce procédé permet des vitesses de production assez élevées bien qu'une phase d'étalement soit nécessaire et peut être utilisé avec plusieurs matériaux, y compris les métaux. En revanche les propriétés mécaniques des pièces produites ne sont pas aussi bonnes qu'avec les procédés de fusion sur lit de poudre à moins d'appliquer un cycle de frittage en phase solide.

La marque Hewlett-Packard a développé un procédé de fabrication additive de pièces polymères semblable au Binder Jetting. Il s'agit du Multi Jet Fusion qui fonctionne avec deux agents au lieu d'un seul. Le premier comme pour le Binder Jetting est l'agent liant, le deuxième est un agent détaillant pour lisser la surface. Chaque couche de matière est chauffée afin de fritter la matière à l'aide des agents liants. La figure 1.7 illustre le procédé Multi Jet Fusion de HP.

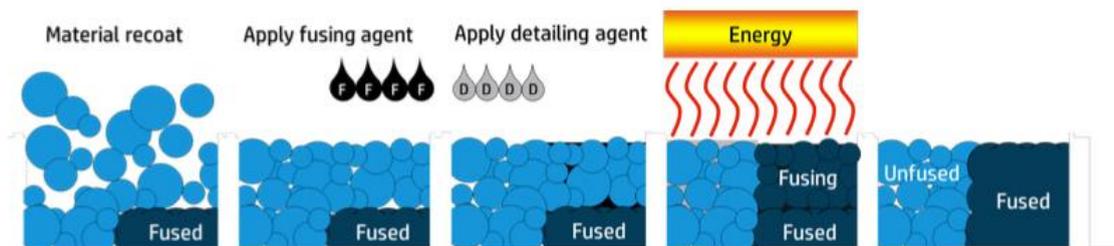


FIGURE 1.7 – Schéma du procédé Multi Jet Fusion [12]

Les procédés de fabrication par projection de liant ne permettent pas d'obtenir les meilleures propriétés mécaniques. En revanche le faible coût et la vitesse de production élevée permet de les utiliser notamment pour du prototypage rapide.

1.2.2 Fabrication additive directe

Contrairement aux procédés à base de lit de poudre, d'autres procédés utilisent la poudre à la manière des procédés de dépôt de filament pour créer la matière solide directement à la sortie de la buse d'impression. Un des avantages de cette méthode par rapport aux lits de poudre est la quantité de matière utilisée pour fabriquer la pièce puisque seule la matière destinée à constituer la pièce est utilisée.

1.2.2.1 Directed Energy Deposition

Il existe plusieurs types de procédés dérivés du procédé DED comme le LMD (Laser Metal Deposition) ou DMD (Direct Metal Deposition). Ce type de procédé consiste à déposer de la poudre via une buse et de la faire fusionner par un faisceau

laser lorsque celle-ci est déposée sur la couche précédente. Cette technique a également pour avantage de pouvoir réparer une pièce. En effet, il est possible d'ajouter de la matière par ce procédé sur une pièce déjà formée. Évidemment il est aussi possible de fabriquer des pièces entièrement avec cette méthode, en revanche il peut être plus difficile de réaliser des formes complexes en raison de l'encombrement que peut créer la buse d'impression. De plus, la résolution et la rugosité de la pièce finale ne sont pas aussi bonnes que celles obtenues en LBM.

Afin que la matière fondue soit solidarisée avec la surface sur laquelle elle est déposée, cette surface est elle-même fondue. Cela permet lors de la solidification de l'ensemble d'avoir une coalescence entre les deux couches de matière.

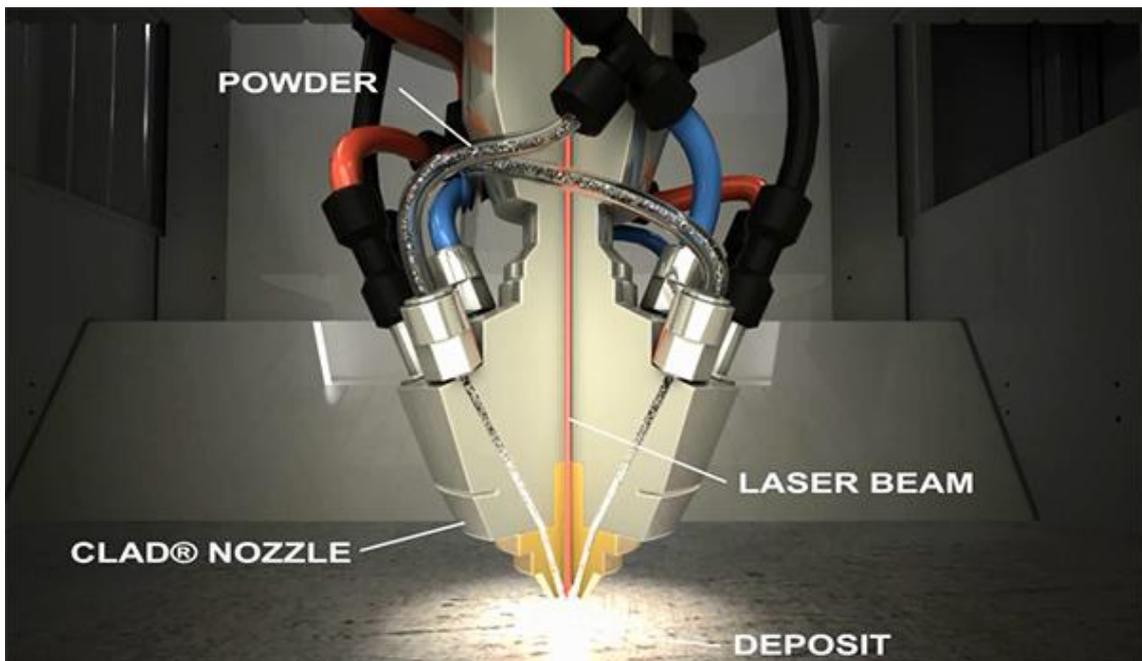


FIGURE 1.8 – Image d'illustration du principe de fonctionnement du procédé CLAD créé par IREPA LASER [13]

Ces procédés permettent de fabriquer des pièces mais aussi d'en réparer puisqu'il est possible d'ajouter de la matière sur une pièce déjà formée. Le taux horaire de fabrication est généralement plus élevée par rapport à la fusion lit de poudre (100 à 200 cm^3/h).

1.2.2.2 Procédés dérivés du DED

Le procédé Cold Spray est une technique d'impression 3D par pulvérisation à froid [14]. De fines particules de poudre sont accélérées dans un flux de gaz comprimé à haute vitesse et sont projetées sur une surface. Lors de l'impact avec le

substrat, leur forte énergie les déforme et leur permet de se lier entre elles pour créer des couches de matière. Ce procédé permet notamment de réparer des pièces endommagées.

1.3 Verrous technologiques

Le travail présenté ici s'intéresse au procédé LBM qui semble avoir un fort potentiel mais n'est cependant pas encore bien maîtrisé. En effet, plusieurs types de défauts peuvent apparaître dans les pièces au cours de la fabrication, ce qui affecte ainsi les propriétés des pièces fabriquées.

Contrairement au procédé EBM réalisé sous vide, le procédé LBM est réalisé sous gaz. Lors de la fusion du lit de poudre, des bulles de gaz peuvent alors rester piégées dans la matière solidifiée et créer des porosités, la densité du lit de poudre doit donc être assez élevée. En plus de fondre la couche de poudre, le laser fait également fondre la couche de matière en-dessous. Cela permet de lier les couches entre elles mais l'intensité du laser peut vaporiser le métal dont la vapeur peut impacter l'interface liquide/vapeur en la creusant jusqu'à faire apparaître un « keyhole » ou capillaire de vapeur. Cela a pour conséquence de générer des multi-réflexions du faisceau laser dans le « keyhole » et ainsi augmenter l'intensité du laser sur une même zone [15, 16]. La couche de matière sous le lit de poudre est alors creusée profondément de manière incontrôlée (Figure 1.9). Cela peut faire apparaître des défauts de microstructures, des contraintes résiduelles ou des bulles de gaz environnant piégées.

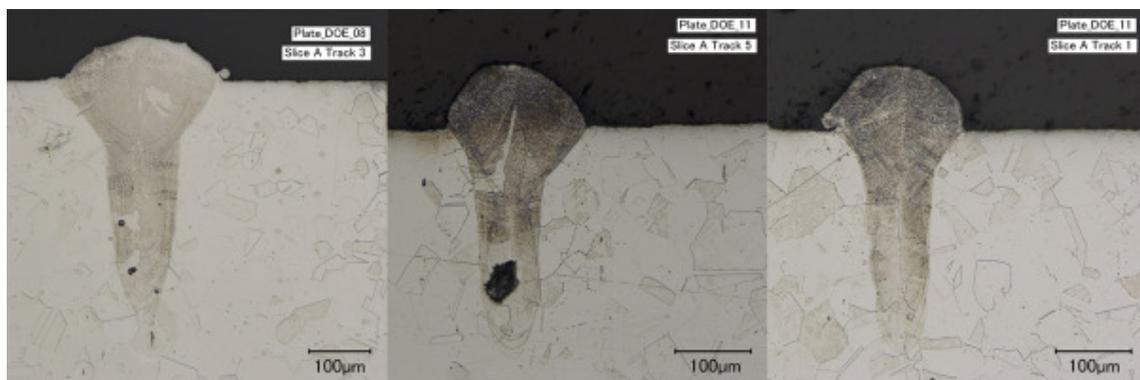


FIGURE 1.9 – Phénomène de keyhole qui creuse la matière [16]

Il peut également y avoir des manques de fusion lorsque de la poudre n'a pas été suffisamment fusionnée par le laser quand la puissance de celui-ci est trop faible par rapport à la quantité de matière à faire fusionner et le temps d'exposition au faisceau.

Lors du tir laser, le gaz chauffe rapidement et peut provoquer des projections en se dilatant. Ces projections peuvent être des particules de poudres ou des morceaux de matière fusionnée « éjectas » qui peuvent gêner la suite de la fabrication. En effet, la présence d'éjectas sur la zone de fabrication peut gêner la phase de fusion laser puisque la puissance du laser n'est pas dimensionnée pour fusionner une quantité de matière supérieure à celle qui est censée se trouver sous le faisceau. De plus, cela peut également gêner l'étalement lorsque de la matière solidement liée au substrat dépasse de la hauteur d'étalement. Le racleur peut venir la heurter et être endommagé comme le montrent les images 1.10.



FIGURE 1.10 – Racleurs endommagés

Lors de la formation de la première couche de matière, l'épaisseur de matière solidifiée correspond généralement à environ 60% de l'épaisseur de poudre étalée (figure 1.11). Au fur et à mesure des couches créées, cette différence disparaît puisque une quantité supérieure de poudre vient se déposer sur la zone fusionnée. Au bout de quelques couches, cette différence disparaît totalement et l'épaisseur de matière solidifiée correspond à l'épaisseur de poudre étalée. Ce phénomène a lieu principalement lors de la fabrication des premières couches qui sont généralement destinées à fabriquer les supports pour pouvoir détacher facilement la pièce finale. Ainsi, les éventuels défauts causés n'impactent pas la pièce finale.

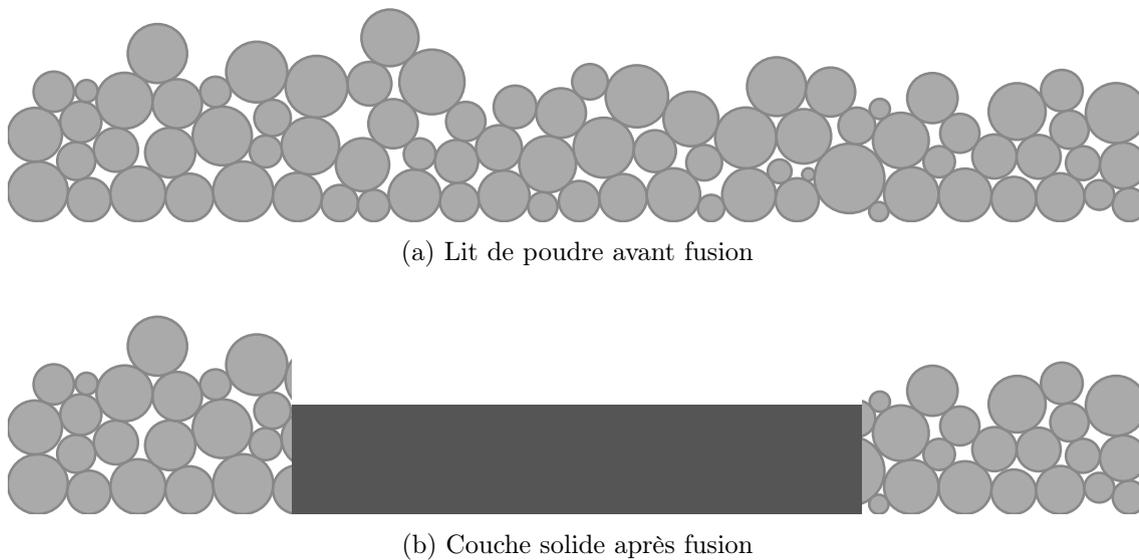


FIGURE 1.11 – Différence d'épaisseur de couche étalée/fusionnée

Lors de l'étalement d'une couche de poudre, il peut apparaître un phénomène de ségrégation [17, 18]. C'est-à-dire que les plus petites particules ont tendance à se déposer en début d'étalement et logiquement les plus grosses particules se retrouvent à la fin. Cela pose un problème puisque la largeur de la distribution de tailles de particules est pensée afin de réduire les vides laissés entre les particules et ainsi augmenter la densité du lit de poudre. Or, lorsqu'il y a de la ségrégation, cet effet est perdu.

Pour éviter l'apparition de défauts dans la pièce, il faut faire en sorte que la phase de fusion laser se passe dans les meilleures conditions. Pour cela, il faut notamment que le lit de poudre soit de la meilleure qualité possible. Il faut donc être capable de définir ce qu'est la qualité du lit de poudre et comprendre comment l'améliorer. C'est la problématique majeure de cette étude.

Pour mesurer la qualité d'un lit de poudre en vue de l'étape du passage du laser, il faut pouvoir estimer la conductivité thermique de celui-ci. Plus la conductivité thermique du milieu granulaire sera grande, plus il permettra une diffusion de la chaleur de manière homogène. Selon l'agencement des grains, la conductivité thermique du lit de poudre peut fortement varier. Un lit de poudre qui a une bonne conductivité thermique est un lit de poudre homogène, dense et avec un maximum de contact entre les grains. Ainsi, les propriétés du lit de poudre étudiées dans ce travail sont l'homogénéité du lit de poudre, la densité et le nombre de coordination. La mesure de l'homogénéité se base sur la méthode Flash qui consiste à mesurer la conductivité thermique d'un matériau et sera explicité plus en détails dans le chapitre 4. La densité du lit de poudre (ou compacité) est le rapport entre le volume

de matière de chaque grain et le volume total du lit de poudre. Enfin, le nombre de coordination est le nombre de contacts moyen par grain. La conduction étant bien plus importante entre les solides que dans le gaz, il faut maximiser le nombre de contacts entre les grains pour maximiser la conduction thermique.

1.4 Poudre métallique et caractérisation

La poudre métallique, matière première du procédé LBM, est évidemment un élément très important dans la qualité finale de la pièce fabriquée. Il est nécessaire de maîtriser et connaître les propriétés des poudres utilisées. Il faut ainsi connaître sa composition chimique pour garantir celle de la pièce finale, il faut également contrôler la morphologie des grains et la granulométrie des échantillons utilisés puisque l'étalement de la poudre et la fusion laser sont impactés par ces propriétés. La densité tapée (compacte) et la densité versée (non compacte) [19, 20] sont mesurées pour estimer la densité du lit de poudre. Enfin la coulabilité est mesurée pour estimer l'étalement de la poudre [21, 22, 23].

1.4.1 Poudres pour le procédé LBM

Parmi les matériaux les plus utilisés en LBM on retrouve des alliages de titane (principalement Ti6Al4V, aussi appelé TA6V), des alliages à base nickel (Inconel 718, Inconel 738, Inconel 625, ...), des alliages d'aluminium, un alliage de cobalt chrome, de l'acier maraging et de l'acier inoxydable. Cette étude se concentre sur les matériaux TA6V et IN718 afin que les trois thèses menées en parallèle s'appliquent aux mêmes matériaux. Pour obtenir une pièce de bonne qualité, il faut que la phase de fusion laser se passe sans défauts. Pour cela, l'épaisseur de la couche doit être bien définie et il est nécessaire que le lit de poudre soit dense et homogène. L'objectif de ce travail est justement de comprendre comment obtenir un tel lit de poudre. Actuellement, les poudres utilisées dans le procédé LBM doivent respecter des recommandations de morphologie des grains et de distributions granulométriques pour garantir une bonne qualité d'étalement. En effet, il est préférable d'avoir des grains les plus sphériques possibles afin d'avoir une bonne coulabilité [24] qui favorise en théorie un meilleur étalement. La taille des grains est également importante puisque cela impacte également l'étalement ainsi que l'action du laser. En LBM, les grains de poudre ont en moyenne un diamètre d'environ 30 microns avec des particules pouvant atteindre 100 μm . Les échantillons de poudre utilisés suivent une distribution granulométrique en forme de cloche (loi normale ou log-normale). Cela permet

notamment d'obtenir une meilleure densité puisque les petites particules peuvent combler les vides laissés par les plus grosses.

1.4.1.1 Inconel 718

L'inconel 718 se caractérise par une bonne résistance à la traction, à la fatigue et au fluage pour des températures allant jusqu'à 700°C [25]. A titre indicatif, chez EOS, le taux de construction laser est de $14,4 \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ avec un laser de 400W même si la vitesse de construction est très dépendante des paramètres procédé et de la géométrie de la pièce.

1.4.1.2 TA6V

L'alliage de titane TA6V se caractérise par une bonne résistance à la fatigue, à la propagation des fissures, à la corrosion et au fluage pour des températures allant jusqu'à 300°C [25]. Chez EOS, la vitesse de construction laser est de $32,4 \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ avec un laser de 400W. La figure 1.12 montre la forme des grains de poudre de TA6V ainsi que la distribution granulométrique d'un échantillon de poudre mesurée expérimentalement.

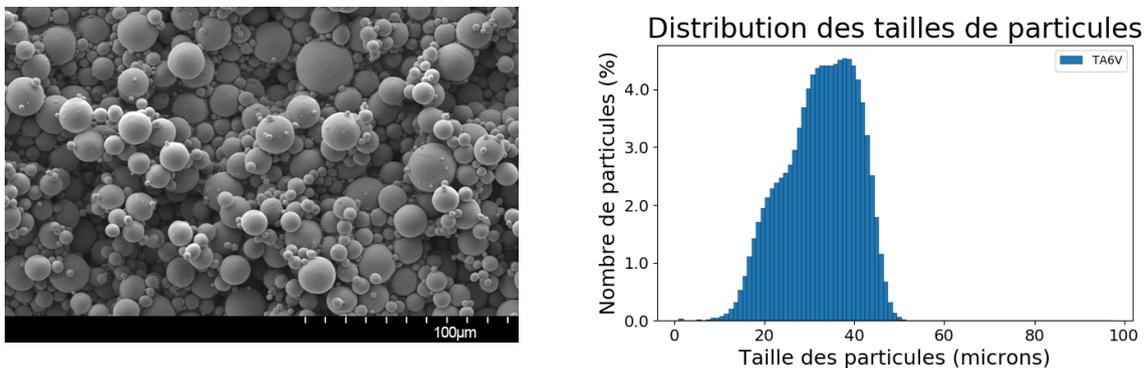


FIGURE 1.12 – Grains de poudre de TA6V et répartition des tailles

1.4.2 Atomisation des poudres

Pour obtenir des grains de poudres avec des propriétés morphologiques et granulométriques correspondant aux besoins des procédés de fabrication, plusieurs procédés de mise en œuvre existent. Cependant le procédé d'atomisation est le plus courant pour les poudres étudiées dans ce travail.

Le procédé d'atomisation consiste à pulvériser un filet de matière en fusion avec un jet de fluide à haute pression pour former de fines gouttelettes. En se solidifiant, les gouttelettes donnent des grains de poudre. L'écoulement laminaire du métal en fusion permet de contrôler la taille et la forme des particules créées. Ce procédé permet d'obtenir des grains très sphériques. Le fluide utilisé peut être de l'eau ou du gaz. Pour les matériaux étudiés, il s'agit de gaz, plus particulièrement de l'air, de l'azote, de l'argon ou encore de l'hélium. Pour éviter la pollution des grains par de l'oxydation éventuelle due à l'air ou à l'azote, il est souvent préféré de réaliser l'atomisation sous argon.

La figure 1.13 montre comment le jet liquide de métal peut se briser pour former des gouttelettes qui se solidifient pour former les grains de poudre. Le schéma du fonctionnement d'une machine d'atomisation de poudre au gaz est présenté sur la figure 1.14.

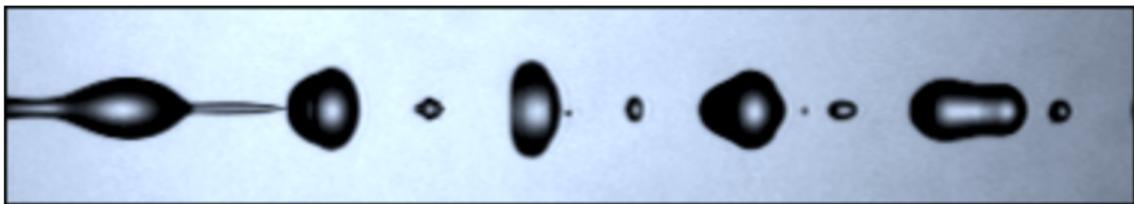


FIGURE 1.13 – Image d'un jet liquide qui se brise pour former des gouttelettes [26]

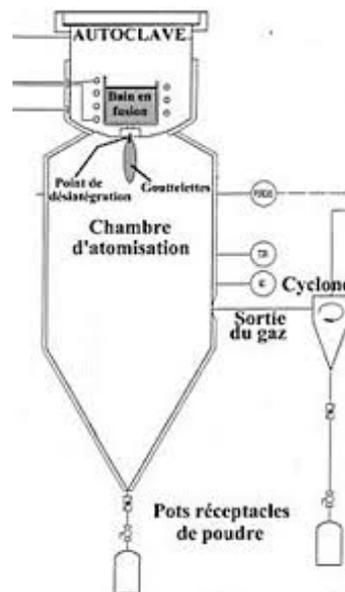


FIGURE 1.14 – Schéma d'une machine d'atomisation [27]

Enfin, il existe d'autres procédés de mise en œuvre de poudre comme des procédés chimiques ou par broyage mais les grains obtenus ont une morphologie plutôt

irrégulière et anguleuse. Ils ne sont pas retenus pour les applications de fabrication additive.

1.4.3 Caractérisation des poudres

1.4.3.1 Granulométrie

La taille des grains et la répartition granulométrique d'un échantillon de poudre utilisé pour une fabrication ont un impact direct sur la densité du lit de poudre. Ainsi, il est nécessaire de caractériser la distribution granulométrique de l'échantillon. Pour cela, plusieurs moyens peuvent être mis en œuvre.

- Observations au microscope optique ou microscope électronique à balayage
- Tamisage
- Granulométrie laser (figure 1.15)

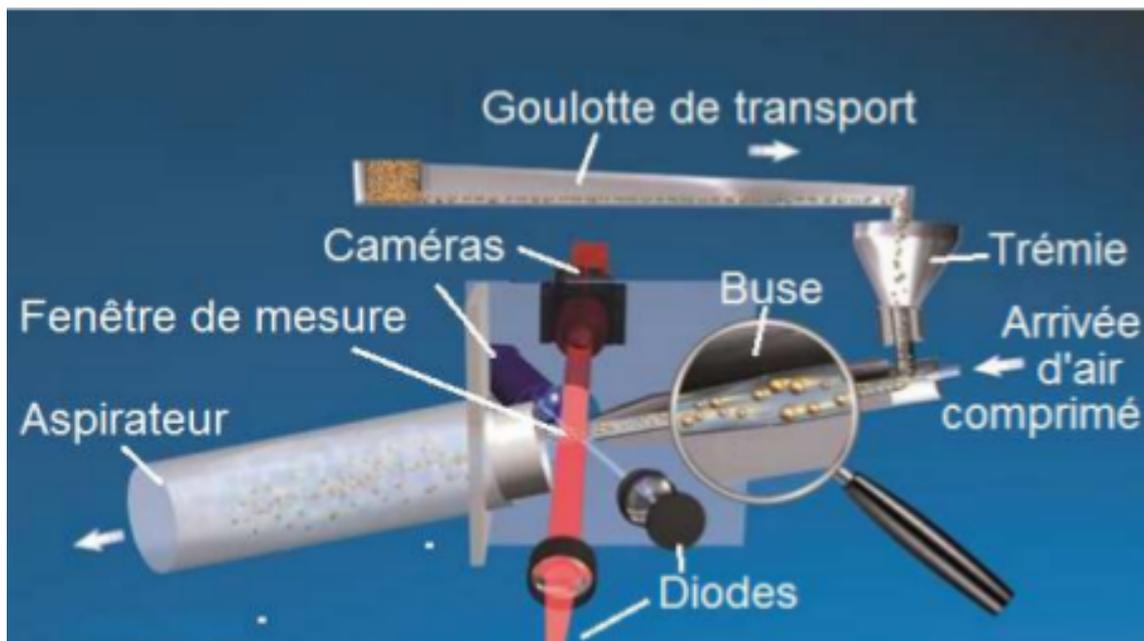


FIGURE 1.15 – Morphogranulomètre laser

Généralement, pour simplifier, on identifie un échantillon de poudre par trois déciles de la distribution granulométrique. Le décile 10 qui correspond à la taille de grain pour laquelle 10% des grains sont inférieurs à cette taille, le décile 50 (ou la médiane) et le décile 90 (taille pour laquelle 90% des grains sont inférieurs à cette taille). On parle en général de D10, D50 et D90.

1.4.3.2 Morphologie

Comme pour la granulométrie, la morphologie des grains peut avoir un impact important sur l'étalement de la poudre et la densité du lit de poudre. L'idéal étant des grains parfaitement sphériques pour favoriser un écoulement fluide et maîtriser l'empilement des grains, les grains utilisés en pratique sont très sphériques. Cependant, de très petites particules peuvent venir s'attacher aux plus grosses par adhésion ce qui forme de petits satellites. Aussi, certaines poudres moins chères peuvent présenter des caractéristiques de morphologie plus éloignées de l'idéal. De la même manière que pour la caractérisation de la granulométrie, il est possible d'utiliser un morphogranulomètre (Figure 1.16) pour mesurer les paramètres morphologiques des grains. Les mesures sont réalisées à partir d'images 2D des particules qui passent devant la caméra de l'appareil.

Il existe plusieurs paramètres, comme la sphéricité ou la rondeur par exemple (figure 1.16), pour caractériser la morphologie d'un grain. En effet les grains ne sont pas parfaitement sphériques et peuvent présenter des formes de nature différente selon le procédé de mise en œuvre utilisé. Différentes formules peuvent être utilisées pour définir la sphéricité d'une particule [28, 29, 30, 31, 32]. En général ces formules sont liées au rapport entre les aires des disques inscrits et circonscrits de la surface visible de la particule $\sqrt{\frac{D_i}{D_c}}$ (Figure 1.16a). Pour la rondeur il existe également plusieurs formules pour la déterminer [33, 32, 34] comme le rapport moyen entre le rayon de courbure de chaque coin de la particule et le rayon du disque inscrit $\frac{(\sum \frac{R_c}{n})}{R_i}$ [32] (Figure 1.16b). Un grain semblable à une ellipsoïde avec une surface plutôt lisse aura une rondeur élevée mais sera peu sphérique alors qu'un grain anguleux dont le diamètre ne varie pas beaucoup sur son volume sera sphérique mais pas très rond.

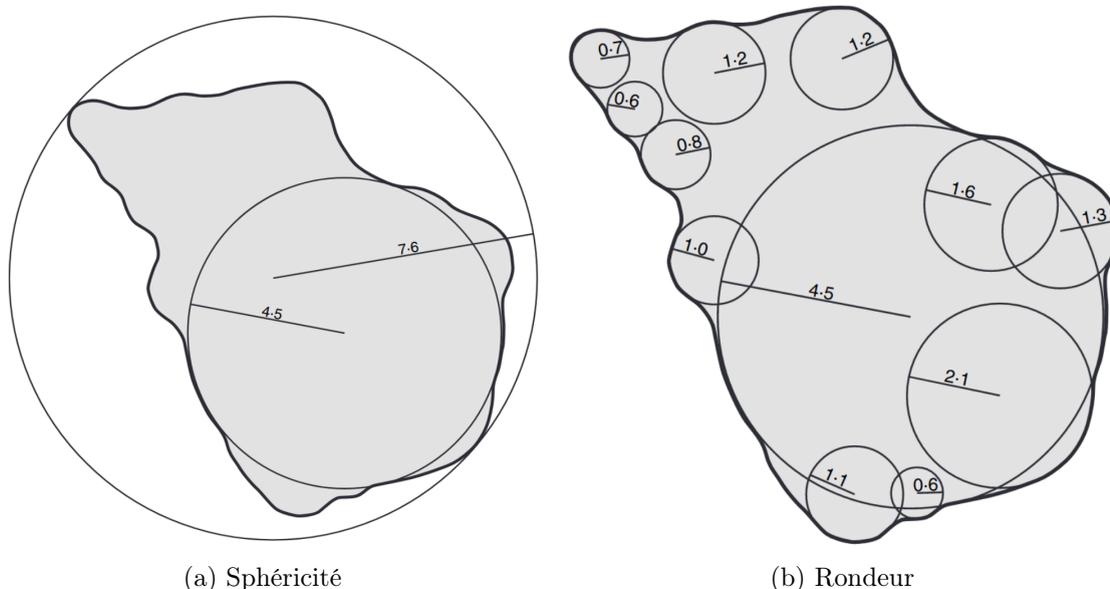


FIGURE 1.16 – Paramètre morphologiques [35]

La granulométrie et la morphologie des grains ont une influence sur les propriétés du comportement global de la poudre comme la coulabilité par exemple qui est une des propriétés les plus importantes lorsque l'on souhaite étudier l'étalement de celle-ci.

1.4.3.3 Coulabilité

La coulabilité d'une poudre est son aptitude à s'écouler librement de manière régulière et constante sous forme de particules individuelles [36]. Plusieurs domaines travaillant avec les poudres comme la pharmacie, l'agro-alimentaire, le BTP ou la métallurgie ont besoin de caractériser la qualité des poudres pour contrôler la qualité des échantillons utilisés. Selon les propriétés de la poudre et les conditions environnementales, la coulabilité est impactée. Afin de caractériser la coulabilité des poudres, différentes méthodes de mesure existent. Suivant le domaine d'application, les méthodes utilisées peuvent être différentes et la coulabilité peut être exprimée par différentes propriétés ou indices. Par exemple, l'indice de Carr et le rapport de Hausner sont deux propriétés pouvant relier la compressibilité et la coulabilité d'une poudre. L'indice de Carr caractérise l'aptitude à la compressibilité et s'exprime sous la forme suivante : $C = 100 \frac{V_A - V_T}{V_A}$ avec V_A le volume occupé par la poudre et V_T le volume tassé de la poudre. Le rapport de Hausner caractérise l'aptitude à l'écoulement et s'exprime sous la forme $H = \frac{V_A}{V_T}$ avec V_A le volume apparent et V_T le volume tassé.

Ces deux indices sont liés par la relation $H = \frac{100}{100-C}$. Cependant, ces indices ont été établis de manière empirique et sont appliqués à des échantillons de poudres de nature très différentes avec des tailles et des formes de grains très variables selon les domaines d'application. La section traitant des différents essais de caractérisation de la poudre montre d'autres moyens pour caractériser la coulabilité et la densité d'une poudre.

1.4.3.4 Cohésion

La cohésion est un phénomène physique important à prendre en compte car cela génère une force qui a tendance à maintenir les grains collés entre eux. En fonction de l'intensité de cette force, l'étalement de la poudre peut être fortement impacté. Pour les poudres métalliques, trois types d'interactions peuvent apparaître.

- Forces de Van der Waals : $F_{VW}(r) = -\frac{AR_1R_2}{(R_1+R_2)6r^2}$ où A est la constante de Hamaker qui dépend des propriétés matériau, R_1 et R_2 les rayons des particules qui interagissent entre elles et r la distance entre les particules.
Ces forces sont dues aux interactions électriques entre les atomes et molécules. Du fait des faibles tailles de grains utilisées en LBM, les forces de Van der Waals peuvent avoir un impact sur les plus petites particules d'un échantillon. Les plus grosses particules ayant une masse plus élevée, leur poids devient trop important face à l'intensité de la force de Van der Waals.
- Pont capillaires : Selon le taux d'humidité dans un échantillon de poudre donné, il y a plus ou moins d'eau. Par capillarité, l'eau a tendance à s'attacher à la surface des grains et peut former des ponts liquides entre deux grains (Figure 1.17), ce qui a tendance à faire s'attirer les grains entre eux.

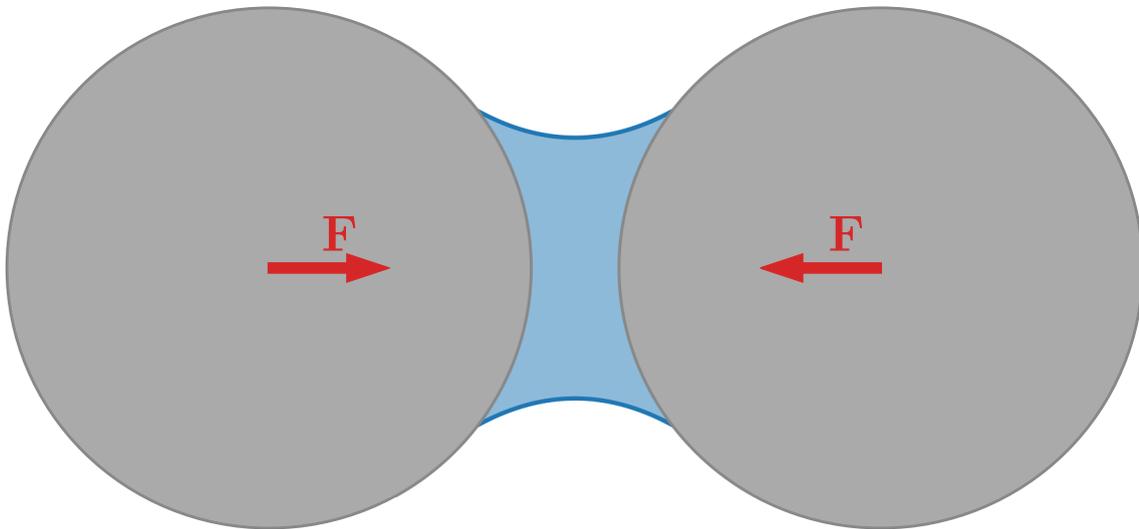


FIGURE 1.17 – Pont capillaire entre deux particules

C'est principalement l'effet de la pression de Laplace qui s'exprime par la relation $P = -\frac{\gamma}{R}$ où γ est la tension de surface entre le liquide et le solide et $-R$ le rayon de courbure du pont liquide à l'interface avec le grain. La pression dans le liquide est inférieure à la pression atmosphérique ce qui engendre une attraction entre les particules. En général les poudres sont étuvées avant chaque fabrication pour minimiser le taux d'humidité.

- Forces électrostatiques : Lorsque deux particules sont chargées électriquement, une force de répulsion ou d'attraction (selon la charge des particules) peut être générée. Les conditions au sein de la machine (liaisons équipotentielles et surfaces conductrices) permettent d'éviter l'apparition de ces interactions entre particules, et donc de raisonnablement les négliger dans la modélisation.

Quelques essais de caractérisation présentés dans la section suivante permettent de caractériser la cohésion au sein d'une poudre.

1.4.3.5 Essais de caractérisation

Pour diverses applications et en particulier pour la fabrication additive, il est important de caractériser le comportement d'un échantillon de poudre donné pour estimer le comportement de celle-ci dans la machine lors de l'étalement. Plusieurs moyens d'essais permettent de caractériser les poudres et les plus utilisés seront présentés dans la suite.

- Angle de talus : L'essai de caractérisation d'une poudre le plus simple à réaliser consiste simplement à la verser sur un support plat et observer l'angle

de repos que forme le tas de poudre résultant. Selon les caractéristiques du milieu granulaire (matériau, taille/morphologie des grains, humidité) l'angle de repos statique peut être différent. Plus l'angle du tas de poudre est faible plus la coulabilité est importante. Le cas du château de sable illustre très bien ce cas puisque du sable sec formera un tas avec un angle d'environ 30° alors que du sable humide permet de mouler des formes avec des angles beaucoup plus prononcés.

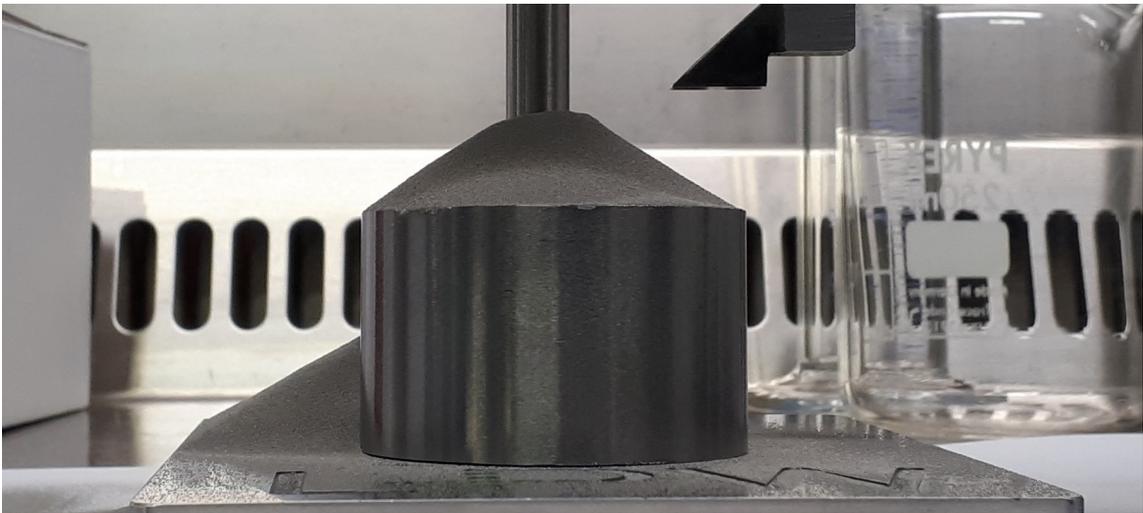


FIGURE 1.18 – Angle de talus

- Tambour tournant : Un autre essai souvent utilisé pour la caractérisation d'un échantillon de poudre est celui du tambour tournant ou tambour rotatif qui consiste à remplir un cylindre à moitié et de le faire tourner à une vitesse donnée pour observer l'angle de repos dynamique (par opposition à l'angle de repos statique de l'essai précédent). L'avantage est justement que la mesure est réalisée sur un mouvement dynamique qui est plus proche de ce qu'il se passe lors de l'étalement. Un angle de repos dynamique faible correspond à une bonne fluidité d'écoulement. Cet angle peut être impacté par le frottement entre les grains, leur forme ou encore les forces de cohésion (Van der Waals, forces capillaires, forces électrostatiques)

L'essai de tambour tournant utilisé dans la suite est un cylindre de 10 cm de diamètre et de 5 cm de hauteur. Les parois sont transparentes afin de réaliser la mesure du profil de poudre par caméra. A haute vitesse la surface libre de la poudre n'a pas un profil linéaire mais plutôt une forme en S. L'angle de repos dynamique est mesuré directement à partir du profil de la poudre. Pour éviter les effets de bord, la mesure est réalisée sur l'angle que forme la poudre au centre du cylindre. Il permet également de mesurer un indice de

cohésion en observant la variation du profil de la poudre au cours du temps par rapport au profil moyen [37].



FIGURE 1.19 – Tambour tournant [37]



FIGURE 1.20 – Résultat obtenu avec une poudre d'inconel

- Mesures de coulabilité (cônes de Hall/Carney)

Il est également possible de mesurer la coulabilité d'une poudre à travers un cône de Hall ou un cône de Carney, ce sont des sortes d'entonnoir. L'essai consiste à faire s'écouler de la poudre à travers le cône. Le temps d'écoulement que met la poudre à s'écouler à travers l'orifice est mesuré pour caractériser la coulabilité. Le cône de Hall a un diamètre de sortie de 2.5 mm (normes ASTM

B213 [21] et ISO 4490 [22]) tandis que le cône de Carney a un diamètre de sortie de 5 mm (norme ASTM B964 [23]). Selon la coulabilité de la poudre, l'écoulement est plus ou moins difficile. Il peut en effet y avoir des interactions cohésives entre les grains qui peuvent bloquer l'orifice de sortie et gêner, voire empêcher l'écoulement.

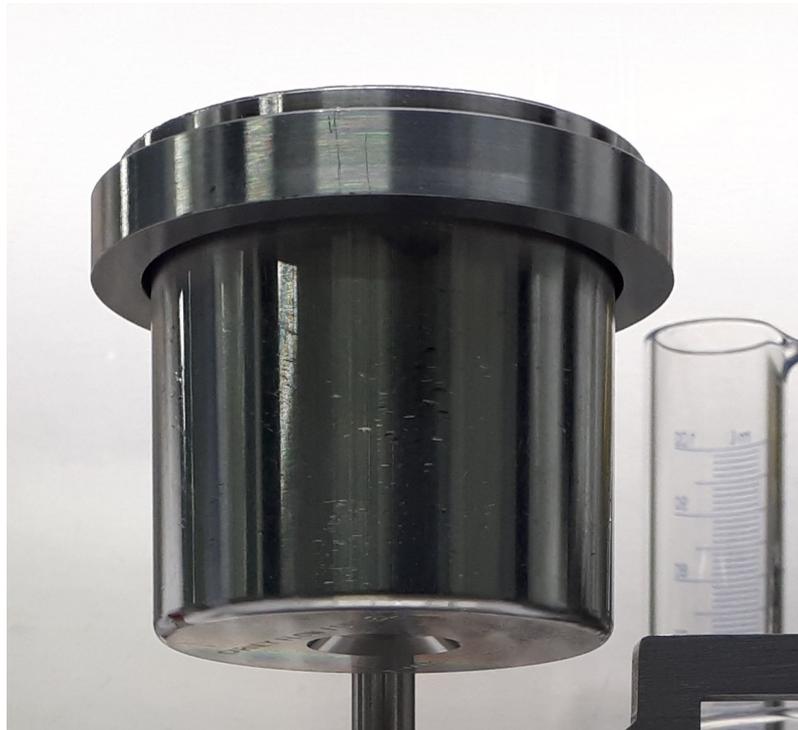


FIGURE 1.21 – Cône de Hall

- Mesures de la compressibilité d'une poudre (figure 1.22) : Cet essai permet notamment de mesurer la densité de la poudre ainsi que l'indice de Hausner puisqu'il permet de compresser la poudre par tapotements successifs. Le tube contenant la poudre est élevé à une hauteur de quelques millimètres puis subit une courte chute libre et ainsi de suite. La hauteur du lit de poudre est mesurée après chaque saut. Ainsi la différence de masse volumique est comparée entre l'état initial et l'état final.



FIGURE 1.22 – Densité tassée [38]

Lorsqu'il s'agit d'étaler une couche de poudre, en addition avec que la coulabilité, la densité tassée ou la densité versée, il semble nécessaire de mesurer la capacité d'une poudre à être étalée. Bien que plus difficile à mesurer, cette propriété est évidemment celle qui est la plus intéressante vis à vis du procédé d'étalement mais son utilisation est encore plus pertinente puisque la meilleure étalabilité n'est pas nécessairement la poudre avec la meilleure coulabilité.

1.4.3.6 Essais expérimentaux de l'étalabilité de la poudre

Il existe quelques études qui essaient de caractériser l'aptitude d'une poudre à produire un lit de poudre d'une bonne qualité. On appelle cela l'étalabilité. Comme il est plus facile de mesurer la coulabilité d'une poudre, c'est généralement les poudres qui ont une meilleur coulabilité qui sont favorisées. Cependant, une bonne coulabilité n'implique pas nécessairement une bonne étalabilité. Tan et al [39] répertorient différents résultats liés à la granulométrie. Ils indiquent notamment qu'une distribution de taille de particules étroite permet d'obtenir une meilleure coulabilité avec une poudre de 316L alors que la densité du lit de poudre est meilleure avec une distribution plus large. Il semblerait également que des poudres avec une distribution granulométrique bimodale (avec un rapport de taille précis néanmoins [40, 41]) permettent d'obtenir une meilleure densité de la pièce finale. Enfin, ils montrent également que les poudres fines permettent d'obtenir une meilleure absorption laser et une meilleure rugosité de surface mais elles ont tendance à former des agglomérats beaucoup plus facilement à cause de l'adhésion et ont une plus faible coulabilité.

Qiu et al [42] montrent qu'une épaisseur de lit de poudre trop importante mène

à une augmentation importante du taux de porosité et de la rugosité de surface dans la pièce. En effet, lorsque le lit de poudre est épais, la puissance du laser ne permet pas de faire fondre le lit de poudre entièrement et de manière homogène. Il reste alors des zones non fusionnées qui augmentent le taux de porosité.

Liu et al [43] montrent qu'une distribution de particules large pour un échantillon de 316L permet d'obtenir une densité élevée mais une faible coulabilité (indice de Hausner $H = 1.22$). Une distribution étroite permet d'obtenir une meilleur coulabilité ($H = 1.16$) mais une densité plus faible. Cependant, le protocole utilisé pour mesurer la densité du lit de poudre s'appuie sur la densité de plusieurs couches à la fois. En effet, il consiste à fabriquer un conteneur par LBM puis à peser la poudre qui se trouve à l'intérieur. Le conteneur contient donc une multitude de couches étalées les unes par-dessus les autres. Or bien que ce soit plus difficile à mesurer, c'est surtout la densité d'une seule couche de poudre qu'il est important de connaître puisque la fusion de la poudre se fait toujours sur une faible épaisseur de poudre.

Enfin, l'essai du tambour tournant qui permet la caractérisation de la rhéologie de la poudre semble prometteur puisqu'il existe un lien entre l'indice de cohésion (défini précédemment), l'angle d'avalanche de la poudre et l'étalabilité [44, 45].

1.5 Simulation de milieux granulaires

L'étalement de poudre est un problème de mécanique granulaire qui a, on l'a vu, engendré beaucoup de travaux en termes de quantification de propriétés granulaires de la poudre mais aussi directement d'études sur le dépôt de lit de poudre. Dans le domaine de la mécanique granulaire, les simulations ainsi que les méthodes numériques associées jouent aussi un rôle important dans la compréhension des phénomènes qui entrent en jeu.

1.5.1 Domaines d'applications

La simulation à l'échelle des particules peut être utilisée dans de très nombreux domaines comme la chimie pour comprendre les interactions entre les atomes ou les molécules, en biologie [46] ou en physique nucléaire [47].

A une plus grande échelle, la simulation des milieux granulaires est utilisée en fabrication additive pour les procédés à base de poudre comme c'est le cas de ce travail. En tribologie, la méthode des éléments discrets permet de modéliser le comportement du troisième corps lors de frottements entre deux corps [48]. L'agro-alimentaire

nécessite également l'étude des milieux granulaires pour améliorer le stockage des récoltes dans les silos [49], l'écoulement à travers ceux-ci ou encore les mélangeurs. Le secteur du bâtiment et des travaux publics est également concerné par ce genre de simulation pour les milieux granulaires avec les différents matériaux nécessaires à la construction tels que le sable ou le ciment ainsi que pour les milieux divisés tel que le comportement d'un mur constitué de briques [50].

Enfin à une échelle encore plus grande, la simulation des milieux granulaires peut être utilisée pour modéliser des phénomènes avec des particules plus grandes comme les avalanches ou les éboulements et chutes de rochers [51, 52]. On peut également évoquer la simulation du problème à N corps qui consistent à simuler les trajectoires des planètes et étoiles en tenant compte de la loi universelle de la gravitation.

1.5.2 Méthodes particulières

Les méthodes présentées dans cette sous-partie sont des méthodes basées sur une description lagrangienne. Cela signifie que les caractéristiques du mouvement de chaque particule composant le fluide sont calculées. En opposition, la description eulérienne calcule les champs de vitesses du fluide en des points fixes.

1.5.2.1 Molecular Dynamics

La méthode Molecular Dynamics (MD) est une technique de simulation de l'évolution dynamique des atomes et molécules principalement [53, 46, 47]. Le mouvement de ces particules est régi par les différentes forces et énergies potentielles créées par celles-ci. La résolution des équations du mouvement de Newton permet alors de prédire le comportement d'un ensemble de particules.

1.5.2.2 Méthode des éléments discrets

La méthode des éléments discrets (DEM, pour Discrete Element Method) ou méthode des éléments distincts s'inspire de la méthode Molecular Dynamics puisqu'il est également question de résoudre les équations de mouvement de Newton pour prédire l'évolution d'un ensemble de particules. En revanche, les particules étudiées sont généralement plus grosses, ce qui implique des différences notables comme la prise en compte des mouvements de rotation ainsi que la possibilité d'avoir des contacts entre les particules. C'est Peter Alan Cundall qui propose cette méthode en 1979 [54]

Un calcul par la méthode des éléments discrets se décompose principalement en trois phases principales à chaque itération :

- La détection des contacts : Ici il s'agit d'identifier les particules qui vont interagir entre elles
- La calcul des forces et moments : Lors d'un contact entre deux particules, plusieurs phénomènes ont lieu comme la répulsion, la dissipation d'énergie, des interactions interatomique, etc. Ces phénomènes génèrent des forces et moments qu'il faut identifier et calculer.
- Le calcul du mouvement des particules en intégrant leur accélérations linéaire et angulaire obtenues par l'application du Principe Fondamental de la Dynamique (PFD)

La principale hypothèse de cette méthode est le fait que l'interpénétration entre les particules est autorisée. C'est grâce à cette interpénétration que la détection des contacts est efficace et que les forces d'interactions sont calculées. Cette méthode permet notamment de modéliser des milieux continus en apportant certains avantages par rapport aux méthodes éléments finis classiques pour étudier les matériaux fragiles et la propagation de fissures par exemple [55, 56]. Elle est également très employée pour simuler le comportement de milieux granulaires. En effet, puisque chaque élément discret peut modéliser un grain, elle est tout à fait adaptée à ce genre de simulations comme le montrent les travaux réalisés par Chen [57] et Meier [58] par exemple qui utilisent la méthode des éléments discrets pour simuler le comportement de poudre métallique lors de l'étalement. Puisque cette méthode est efficace pour modéliser le comportement de milieux granulaires et montre des résultats intéressants sur la simulation d'étalement de poudre, il s'agit de la méthode retenue pour réaliser l'étude rapportée dans ce mémoire.

1.5.2.3 Non-Smooth Contact Dynamics

La Non-Smooth Contact Dynamics (NSCD) est une technique de modélisation mécanique qui contrairement à la méthode des éléments discrets n'exige pas que les évolutions temporelles des positions et vitesses soient des fonctions lisses (régularisées). Ici il n'y a pas d'interpénétration entre les particules. Lors d'un contact par exemple, la vitesse de chacun des corps subit un saut au moment instantané de l'impact. Cette méthode a été initiée et développée par Jean-Jacques Moreau [59] et est particulièrement efficace lors de l'étude d'ensembles de corps rigides ou déformables soumis à des déformations sous l'effet d'un chargement [60].

1.5.3 Méthodes non-particulaires

1.5.3.1 Smoothed Particle Hydrodynamics

La méthode Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) est une méthode de simulation numérique sans maillage utilisée principalement pour simuler des problèmes de mécanique des milieux continus, tels que la mécanique des solides et les écoulements de fluides. Elle a été développée par Gingold et Monaghan [61] et Lucy [62] en 1977, initialement pour des problèmes d'astrophysique, afin de simuler la formation de galaxies, d'étoiles et de collision de corps astronomiques.

Il est également possible de simuler le comportement d'un milieu granulaire comme le montre l'étude de Yin et al [63] qui utilisent la méthode SPH pour étudier l'effondrement d'une colonne de grains.

1.5.3.2 CFD

La méthode Computational Fluid Dynamics (CFD) est une méthode numérique utilisée en mécanique des fluides pour la résolution de problèmes qui impliquent des écoulements de fluides. Contrairement aux autres méthodes évoquées précédemment, cette méthode se base sur une description lagrangienne pour caractériser l'écoulement des fluides. Cela signifie que l'écoulement est décrit par des champs de vitesses en chaque point du maillage. Un milieu granulaire peut s'écouler et peut donc être considéré comme un fluide avec des propriétés d'écoulement propres. Il est donc possible d'utiliser la CFD pour simuler le comportement d'un milieu granulaire [64]. C'est le cas par exemple du travail de Riber [65] qui étudie l'écoulement d'une poudre avec une méthode continue car cela permet des coûts de calculs plus faibles qu'avec une méthode discrète lorsque la quantité de grains à simuler est importante. En revanche la difficulté réside dans la recherche d'une loi de comportement représentative de l'écoulement granulaire.

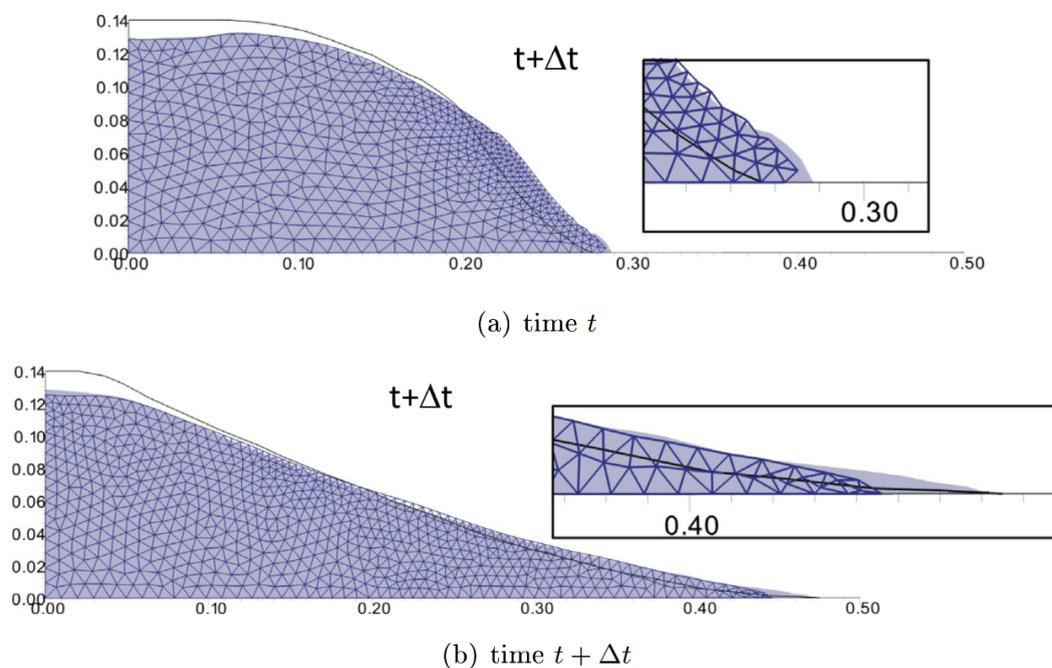


FIGURE 1.23 – Méthode CFD pour la simulation d'écoulements granulaires [65]

1.6 Simulation numérique de l'étalement de poudre

Malgré les études présentées dans la section précédente, il apparaît toujours difficile de réaliser des analyses expérimentales de l'étalement de poudre en lien avec la morphologie et les propriétés de la poudre sans passer par des campagnes multiparamétriques fastidieuses et coûteuses. C'est pour cela que le développement en parallèle de simulations numériques dédiées à l'étalement émerge de plus en plus dans un but tout d'abord de compréhension. Les travaux de modélisation du comportement granulaire lors de l'étalement de poudre dans le procédé LBM ont débuté il y a quelques années seulement mais de plus en plus de publications scientifiques voient le jour sur ce sujet.

1.6.1 Modélisation du procédé

La modélisation de l'étalement de poudre doit prendre en compte les différents éléments qui interviennent lors du procédé. Cela comprend la modélisation de la poudre, des différents éléments du procédé comme le racleur ou la pièce en fabrication ainsi que les nombreux paramètres procédé. Les paramètres matériaux influent sur le comportement des grains au cours de l'étalement, ainsi les forces d'interactions

doivent être identifiées et prises en compte.

Modélisation des grains : La modélisation de la poudre est un élément essentiel pour développer une simulation représentative de l'étalement réel. Parteli et Pöschel [66] proposent une étude sur les caractéristiques du lit de poudre déposé sur la zone en fabrication par un rouleau dans le procédé SLS et dans leur étude, la poudre étudiée est une poudre de PA12 (polymère) dont les grains ont des formes quelconques. Cette forme géométrique complexe est prise en compte. Un grain est modélisé par un ensemble de sphères (cluster) agencées de telle sorte que la forme globale représente une particule non-sphérique réelle observée sur des images microscopiques (Figure 1.24).

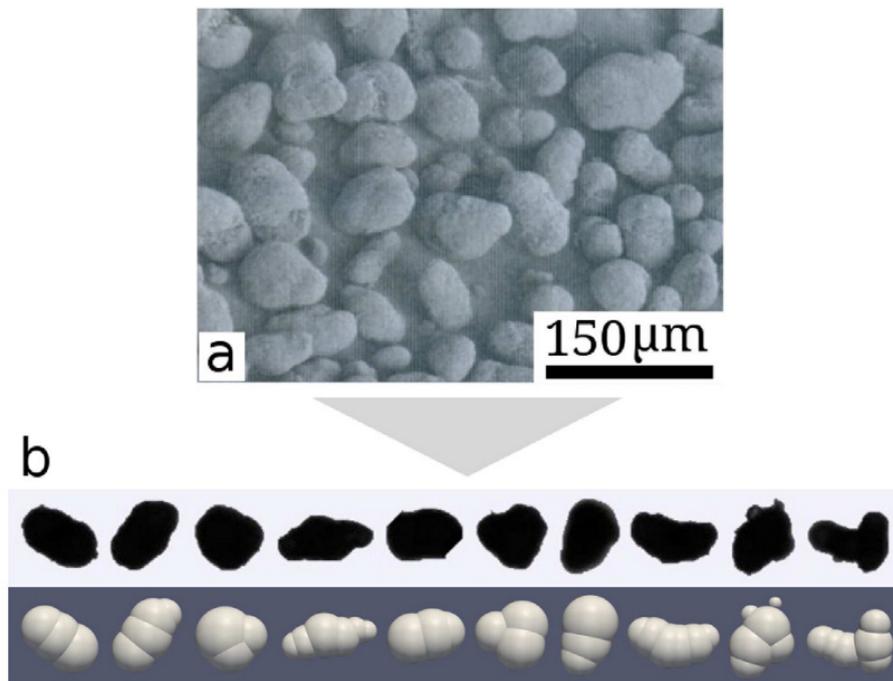


FIGURE 1.24 – Particules non sphériques de PA12 (polymère) [66]

Nan et al [67] ont aussi utilisé des particules non-sphériques pour modéliser des grains de 316L. Ces grains plus sphériques que ceux de Parteli et Pöschel, présentent néanmoins des satellites à leur surface. La méthode des clusters est également employée dans ce cas pour reproduire la forme réelle des grains (Figure 1.25).



FIGURE 1.25 – Cluster de sphères, grains de 316L [67]

Dans les procédés à base de poudre métallique, en particulier pour le titane et l'inconel, les particules sont très sphériques grâce au procédé d'atomisation gaz/eau [68]. Cependant, l'objectif principal des études de Nan et de Parteli n'est pas d'étudier spécifiquement l'effet de la non-sphéricité des particules, les résultats de ces études sont présentés dans la suite.

Paramètres influents sur le procédé : La simulation de l'étalement de poudre demande également la modélisation précise du procédé avec notamment la modélisation du racleur. Il peut être de différentes formes selon les machines, Haeri [11] propose d'optimiser la forme de celui-ci en utilisant une lame avec un rayon de courbure bien particulier (Figure 1.26) et a montré qu'il était possible d'obtenir une densité très élevée grâce à cela.

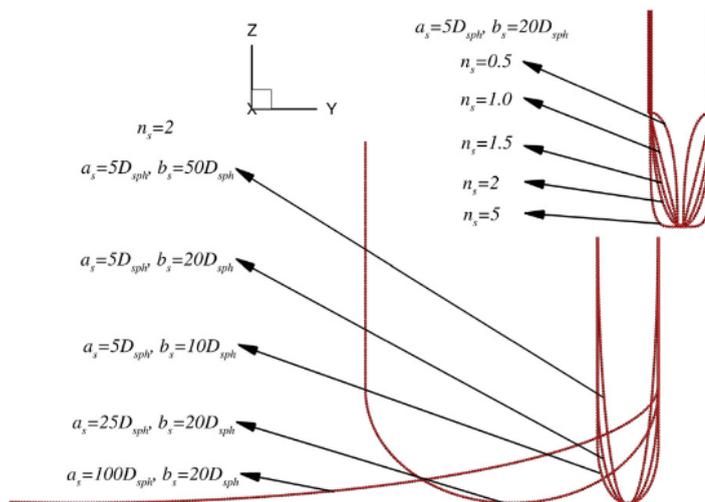


Fig. 3. Different spreader profiles used for the optimisation. Only a subset of all designs are presented to show the effects of changing parameters a_s , b_s and n_s . Only half of the widest blade with $a_s = 100D_{sph}$ is presented.

FIGURE 1.26 – Optimisation de la forme du racleur [11]

La taille des grains est de l'ordre de grandeur des propriétés de rugosité de la surface du plateau ou du substrat. La rugosité de la surface doit alors être prise en compte. Nan et Ghadiri [67] ont choisi de simuler la rugosité de surface avec des cylindres disposés côte-à-côte. Les cylindres côte-à-côte ont l'inconvénient de présenter une rugosité perpendiculairement au sens de l'étalement seulement, ce qui forme une barrière peu représentative d'un écoulement sur une rugosité réelle en trois dimensions.

Lois de comportement : Les études citées précédemment utilisent toutes des modèles semblables pour modéliser les contacts entre les grains. Il y a quatre effets principaux qui sont modélisés. Un contact entre deux particules entraîne une force de répulsion, de la dissipation d'énergie, du frottement et éventuellement de l'adhésion. Il y a deux solutions qui se dégagent pour modéliser la raideur de contact. Haeri [11] ou Meier et al [58] modélisent le contact par une force de répulsion linéaire : $F = k\delta$ où k est la raideur du contact et δ est l'interpénétration entre les deux grains en contact. Chen et al [57] ou encore Li et al [69] modélisent cette force par le modèle de contact décrit par Hertz [70] : $F = \frac{4}{3}E^*\sqrt{R^*}\delta^{\frac{3}{2}}$ avec E^* et R^* le module d'Young et le rayon équivalents des deux particules en contact.

L'autre force pour laquelle des différences apparaissent entre les différents modèles est l'adhésion entre les particules. Deux modèles sont généralement utilisés. Le premier est le modèle JKR (Johnson-Kendall-Roberts) [71] qui se base sur le modèle du contact de Hertz et qui prend en compte une énergie d'adhésion sur les surfaces

de deux particules en contact. L'expression de la force d'adhésion donnée par le modèle JKR est la suivante : $F = -\frac{3}{2}\pi R^*\gamma$ où γ est l'énergie d'adhésion. Le deuxième modèle est le modèle DMT (Derjaguin-Muller-Toporov) [72] qui néglige l'effet de la déformation des grains par rapport à l'effet d'adhésion et qui donne l'effort maximal attractif par la relation $F = -2\pi R^*\gamma$. Dans les deux cas, l'expression de la force d'adhésion a la même forme à une constante près.

Caractérisation des paramètres matériaux du modèle : Lorsque le modèle numérique est établi, il faut pouvoir être en mesure de connaître les valeurs des paramètres matériaux à intégrer au modèle. Par exemple, un des paramètres matériaux les plus importants à connaître est l'énergie d'adhésion. Pour connaître sa valeur pour un échantillon de poudre donné, il est trop difficile techniquement de mesurer expérimentalement la force d'adhésion entre deux grains. Cependant, il est possible de réaliser des essais de comportement global de la poudre et de comparer ceux-ci à des simulations équivalentes pour identifier les valeurs des paramètres matériaux de la poudre. Meier et al [73] proposent un essai permettant d'identifier le paramètre d'adhésion de leur modèle numérique en réalisant des essais d'angle de talus et en comparant le résultat de l'essai expérimental à la simulation numérique équivalente. Ils montrent notamment que l'adhésion a un impact très important sur la forme du tas de poudre. Plus l'adhésion est importante, plus l'angle de talus est grand et plus le profil du tas est irrégulier (Figure 1.27). Puis ils comparent également les résultats des simulations avec des essais expérimentaux (Figure 1.28) et parviennent à obtenir des résultats concordants. Enfin ils montrent qu'avec le modèle numérique utilisé, l'angle de talus ne dépend pas des autres paramètres du modèle numérique.

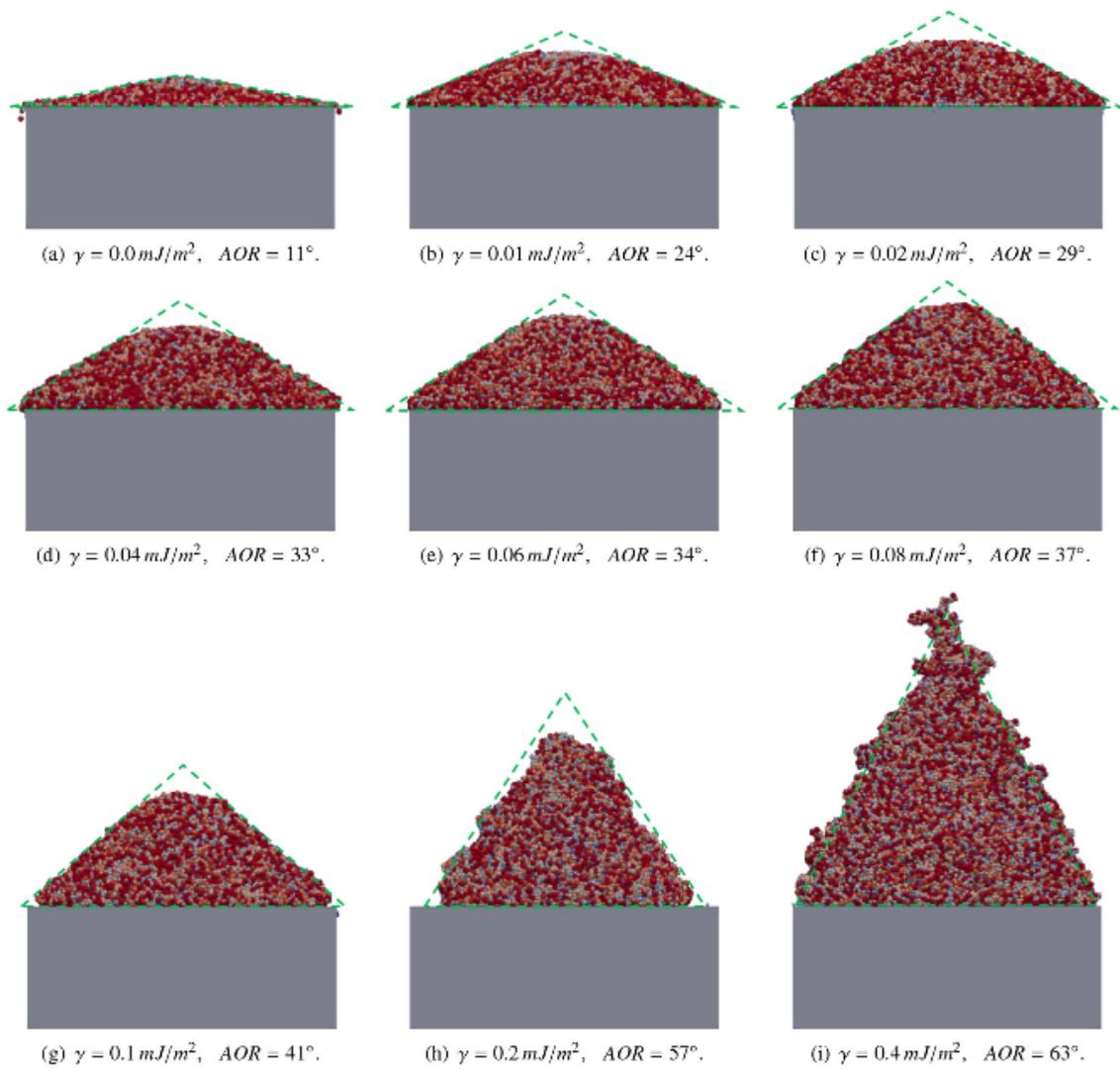


FIGURE 1.27 – Influence de l'adhésion sur l'angle de talus [73]

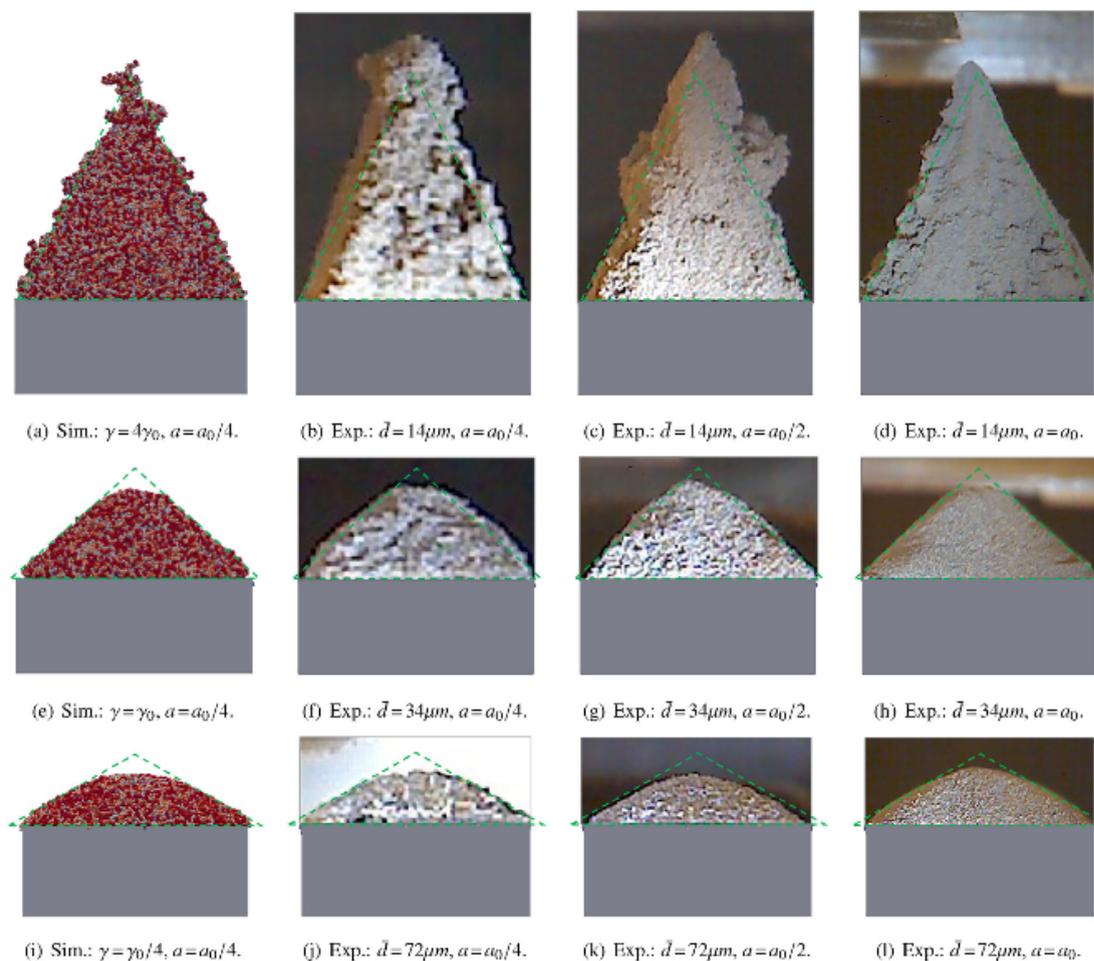


FIGURE 1.28 – Comparaison simulation/expérience [73]

1.6.2 Principaux résultats de l'étude bibliographique

Chen et al. [57] proposent notamment des simulations d'étalement de poudre d'acier inoxydable 316L par l'intermédiaire d'une lame et utilisent deux moyens de caractérisation de l'écoulement : l'angle de repos dynamique (DRA) qui est l'angle que forme le tas de poudre devant le racleur lors de l'étalement et le débit massique (MFR) de poudre mesuré entre la lame et le lit de poudre. L'analyse image par image d'une vidéo d'un étalement réel comparé à une simulation montre des résultats concordants pour l'angle du tas devant le racleur (Figure 1.29).

Ce travail montre également que plus la taille des particules est petite, plus la fluidité de l'écoulement (caractérisée par un DRA petit) est grande. Cependant, à partir d'un certain seuil de taille de particule (rayon $< 21.8\mu m$), les forces d'adhésion deviennent non-négligeables par rapport au poids des particules et ont un effet néfaste sur la fluidité. Le nombre adimensionné Granular Bond Number qui compare

la force d'adhésion avec le poids de la particule permet d'illustrer cet effet comme montré par Nase et al [74]. $B_{og} = \frac{\text{Adhésion}}{\text{Poids}} = \frac{2\pi\gamma R}{\frac{4}{3}\pi R^3 \rho g} \sim \frac{1}{R^2}$ où R est le rayon du grain. Plus le grain est petit, plus l'effet de l'adhésion est important.

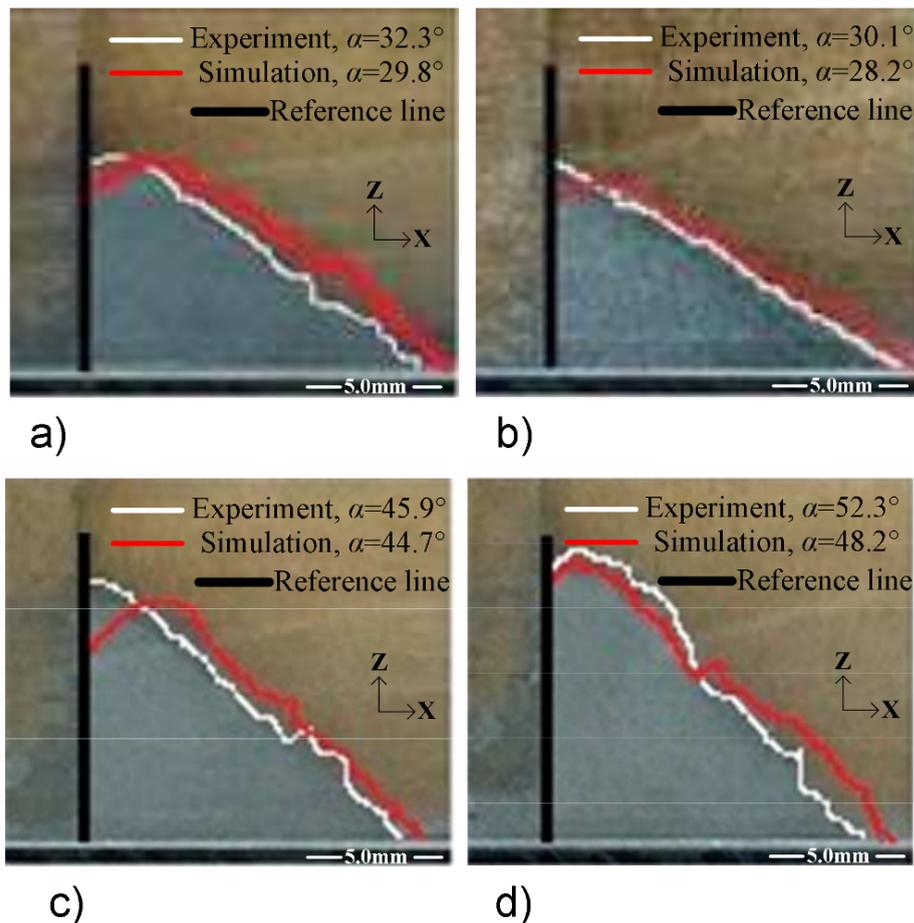


FIGURE 1.29 – Comparaison entre le profil expérimental et le profil simulé de la poudre lors de l'étalement par la lame pour différents rayons moyens de particules (a) $R = 84.7\mu m$, (b) $R = 61.6\mu m$, (c) $R = 17.4\mu m$, (d) $R = 12.2\mu m$ [57]

Ils montrent également dans une autre étude [75] que l'éventualité d'utiliser des poudres bimodales dans le but d'améliorer la densité peut fonctionner dans un milieu granulaire 3D mais ce n'est pas forcément efficace dans une fine couche de poudre. De plus, cela pourrait favoriser l'effet de ségrégation.

Nan et al [67] proposent également des simulations d'étalement où ils étudient notamment l'influence de la taille de l'intervalle (δ par rapport au diamètre des particules D) entre le racleur et le plateau (figure 1.30), ce qui correspond dans ce cas à l'épaisseur de couche étalée. Le volume de poudre étalée augmente linéairement avec le rapport δ/D et la vitesse des particules proches du plateau décroît linéairement.

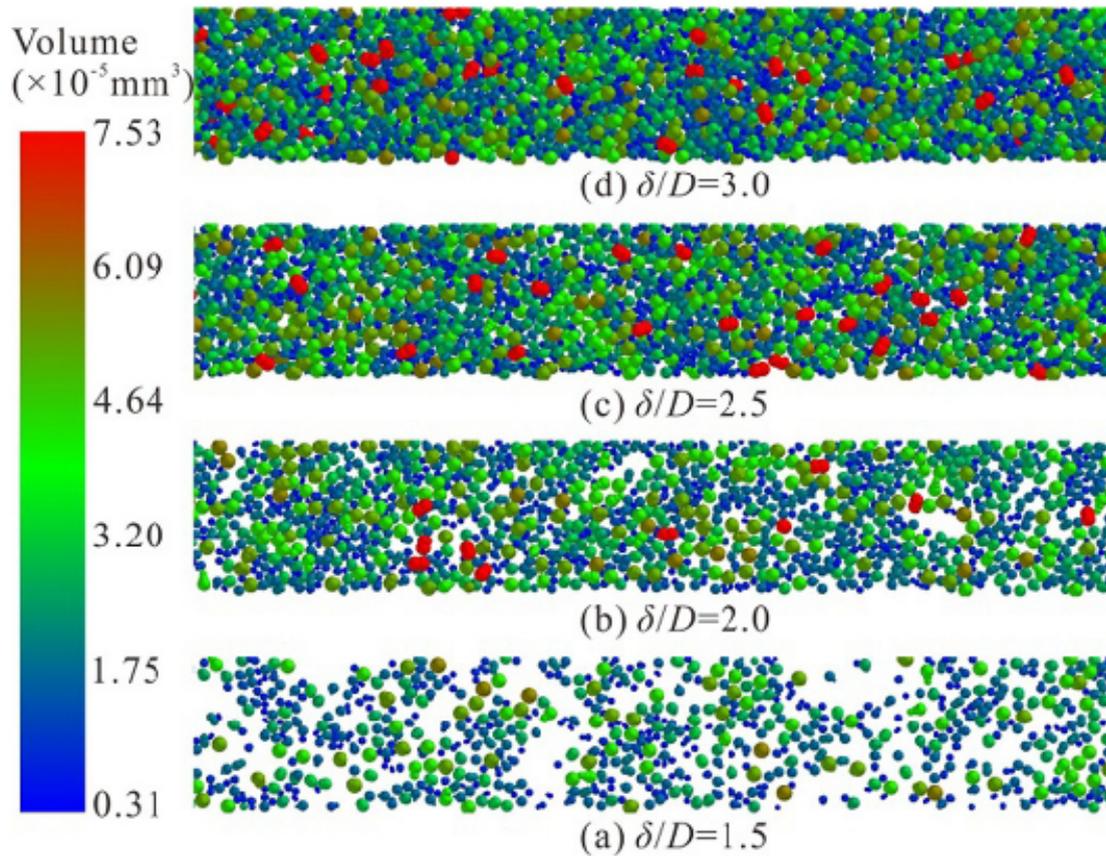


FIGURE 1.30 – Influence de la hauteur de l'intervalle racleur/plateau [67]

Meier et al [58] proposent une caractérisation du lit de poudre final obtenu après étalement en mesurant la densité du lit de poudre et la rugosité du lit de poudre. Ils montrent notamment qu'une faible épaisseur de couche de poudre implique une faible densité et que cette densité augmente avec l'épaisseur. L'impact de l'adhésion des poudres est également observé par rapport à l'épaisseur de couche et les résultats montrent que pour de faibles épaisseurs, une adhésion élevée donne un lit de poudre peu dense alors que la densité est bonne lorsque l'épaisseur est élevée. En revanche, la rugosité du lit de poudre est beaucoup plus irrégulière avec une adhésion élevée, quelle que soit l'épaisseur de couche (Figure 1.31).

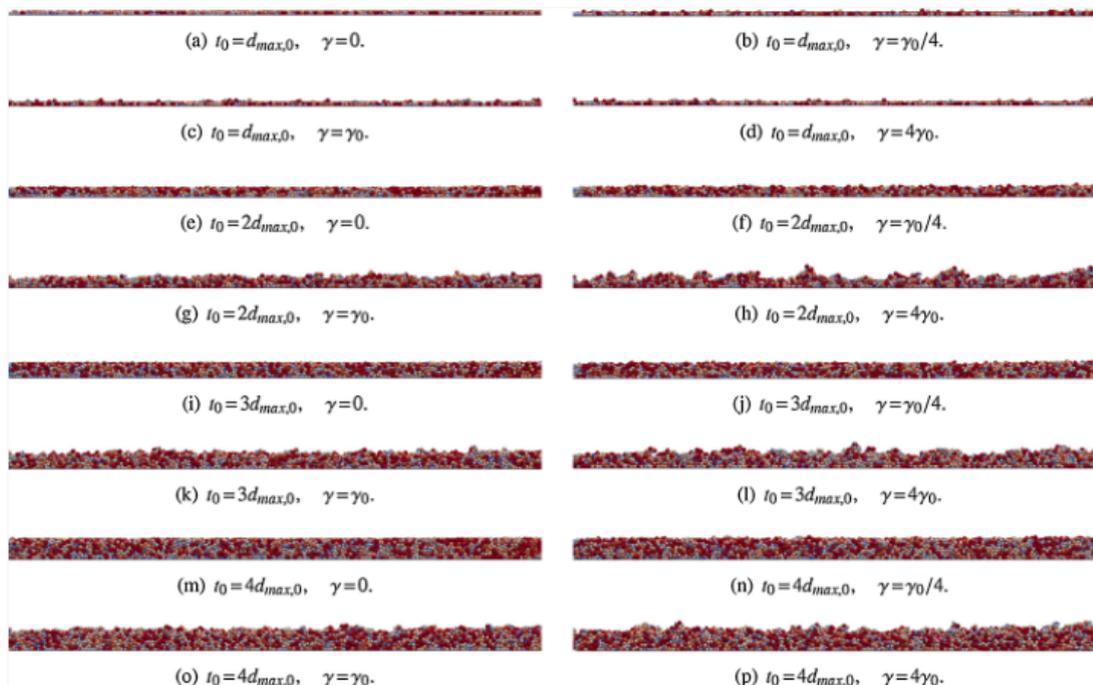


FIGURE 1.31 – Étalement de poudre pour différentes épaisseurs de couche et différentes adhésions [58]

Zielinski et al [76] ont étudié l'influence de l'agencement des grains dans le lit de poudre sur la qualité de la fusion laser en comparant le lit de poudre étalé et le lit de poudre structuré cubique centré sur le corps (BCC) et ont montré que le lit de poudre BCC produit une fusion homogène alors que le lit de poudre étalé présente un bain de fusion irrégulier. Il est alors important de comprendre quels paramètres influencent la qualité finale du lit de poudre. Le temps de production est influencé par le temps de la phase d'étalement de la poudre car un grand nombre de couches est nécessaire pour produire une pièce (par exemple 5000 couches de $60 \mu m$ nécessaires pour une hauteur de 30cm). On peut vouloir augmenter la vitesse du racleur ou augmenter l'épaisseur des couches déposées pour accélérer la phase d'étalement, mais comment cela affecte-t-il la qualité finale du lit de poudre? Certaines machines utilisent une lame comme système de revêtement, d'autres un rouleau ou une brosse. Certains racleurs sont rigides (métaux), d'autres sont flexibles (silicium). Haeri [11] a étudié l'optimisation de la géométrie de la lame pour améliorer la qualité du lit de poudre et obtenir un meilleur lit de poudre qu'avec un rouleau ou une lame classique.

Fouda et al [77], ont étudié l'effet de la vitesse du racleur et de l'épaisseur de l'interstice sur la compacité et la vitesse des particules avec des échantillons de poudres mono-disperses (chaque particule a la même taille). Ils ont montré que la compacité pouvait être améliorée en faisant varier la vitesse du racleur et l'épaisseur

de l'interstice.

Selon le matériau, la taille des grains ou la répartition de la poudre, la qualité finale du lit de poudre est différente. En effet, les paramètres du matériau tels que l'adhésion combinée aux plus petites particules détériorent fortement la qualité du lit de poudre en raison de la formation d'amas et de cavités comme le montrent Chen et al [57, 75] et Meier et al [58] sur les poudres TA6V. Dans ce cas, les forces d'adhésion deviennent plus influentes que le poids des grains.

L'étude du paramètre d'adhésion est alors fondamentale. La principale cause d'une poudre adhésive est l'humidité, plus elle est humide, plus il y a d'adhésion. Il est important de comprendre comment ce paramètre affecte l'étalement de la poudre afin de savoir dans quelles conditions la poudre doit être stockée et si l'étalement de la poudre doit se faire sous atmosphère contrôlée par exemple. Les paramètres matériaux des poudres sont compliqués à identifier pour ces modèles et la meilleure solution semble être la mesure de l'angle de repos des échantillons de poudre, comme l'ont fait Meier et al [73]. Par ailleurs, dans cette étude Meier et al montrent que les paramètres de raideur de contact, de coefficient de restitution et de coefficient de frottements qui entrent en jeu dans le modèle numérique n'ont pas d'effet sur le résultat d'angle de talus.

1.7 Verrous scientifiques

L'étude de l'état de l'art montre que plusieurs travaux, notamment expérimentaux, ont récemment commencé sur l'étalement de poudre sur la zone de fabrication. Le procédé d'étalement de poudre fait intervenir de nombreux paramètres qui ont une influence sur la qualité du lit de poudre déposé. Comme le montrent les études présentées, l'adhésion au sein de la poudre est un paramètre clef, en revanche il est difficile de caractériser l'adhésion au sein d'une poudre pour obtenir des simulations représentatives d'un étalement réel. Un autre point important à relever de ces études est que la qualité du lit de poudre est souvent définie par sa densité, cette propriété peut ne pas être suffisante pour caractériser un bon ou un mauvais lit de poudre par rapport à l'opération du laser. Il apparaît à la lecture de cet état de l'art que le développement de simulations numériques de l'étalement est encore à ses débuts mais qu'il pourrait devenir un outil d'une grande aide dans quant à l'objectif de certifier une poudre à l'étalement en fabrication additive.

L'objectif de ce travail de thèse sera donc de développer un code de calcul avec un modèle numérique permettant de simuler l'étalement de la poudre à l'échelle du

grain avec un comportement granulaire réaliste. Le choix de la méthode numérique employé se porte sur la méthode des éléments discrets qui est bien adaptée à la simulation à l'échelle du grain ? C'est également la méthode la plus employée dans la littérature pour des études de ce type. Un point majeur de ce travail sera donc d'être capable d'identifier les paramètres matériaux qui entrent en jeu pour suivre le comportement d'une poudre métallique ainsi que de caractériser les valeurs de ces paramètres. Une fois le modèle fonctionnel et les paramètres matériaux identifiés, il sera important de comprendre l'influence de certains paramètres procédé et le couplage entre eux. Le but est de pouvoir être en mesure de proposer des solutions sur les configurations de paramètres à utiliser pour garantir une bonne qualité du lit de poudre. Cela doit permettre le bon déroulement de la suite du procédé. Le développement d'une méthode de caractérisation de la qualité du lit de poudre permettra de faciliter ces analyses. Ce travail pourra permettre une poursuite de l'étude du procédé en intégrant une modélisation de la phase de fusion laser comme le montre l'étude réalisée par Steuben et al [78] ou Gobal et al [79] qui simulent l'effet du laser sur un lit de poudre modélisé de manière discrète.

Chapitre 2

Modélisation numérique de l'étalement de poudre

Résumé

Ce chapitre consiste à présenter les développements réalisés et les choix de modèles pour obtenir une simulation de l'étalement de poudre représentative d'un étalement réel. Il s'agit de développer un nouveau code de calcul basé sur la méthode des éléments discrets et la bibliothèque GranOO open-source qui offre des outils performants pour réaliser une simulation d'un milieu granulaire. Les grains de poudre sont modélisés par des sphères parfaites et la distribution granulométrique peut être générée à partir de mesures expérimentales. Différentes géométries de racleurs peuvent être prises en compte et la rugosité de surface de la pièce en fabrication est modélisée. Les différentes lois d'interactions considérées sont présentées et les valeurs des paramètres matériaux qu'elles font intervenir devront être identifiées. Le coût de calcul de la méthode des éléments discrets étant dépendant du nombre de particules, plusieurs stratégies sont mises en place pour optimiser le modèle comme l'utilisation de conditions périodiques par exemple.

Sommaire

2.1	Méthode des éléments discrets	55
2.1.1	Principe de fonctionnement	55
2.1.2	Choix du code de calcul	55
2.2	Description du modèle géométrique	56
2.2.1	Modélisation de la poudre	57
2.2.2	Modélisation du procédé	60
2.2.2.1	Système de mise en couche	60
2.2.2.2	Alimentation en poudre	61
2.2.2.3	Paramètres procédé	62
2.2.3	Rugosité de surface	63
2.3	Description du modèle de comportement	66
2.3.1	Lois d'interactions entre les grains	66
2.3.2	Intégration numérique du mouvement	69
2.4	Optimisations numériques	71
2.4.1	Méthode de détection des contacts	71
2.4.2	Conditions périodiques	74
2.5	Choix du domaine d'étude	75
2.6	Choix des paramètres numériques	78
2.6.1	Raideur	78
2.6.2	Coefficient de restitution	79
2.6.3	Coefficient de frottement	79
2.6.4	Énergie d'adhésion	79
2.7	Conclusion	79

2.1 Méthode des éléments discrets

La méthode des éléments discrets (DEM), initialement présentée par Cundall [54], est la méthode choisie pour réaliser les simulations de cette étude car elle est particulièrement adaptée aux simulations de milieux granulaires. Dans ce travail, les simulations sont réalisées en 3D avec la plateforme open source GranOO développée en C++ [80] et basée sur la méthode des éléments discrets.

2.1.1 Principe de fonctionnement

La simulation d'un milieu granulaire avec la méthode des éléments discrets consiste à modéliser chaque grain par un élément discret. Chaque grain est soumis à différentes forces et moments de forces au cours du temps. Il y a la force liée à la gravité ainsi que les forces et moments générés lors des interactions entre les grains et avec les éléments externes. Par l'application du principe fondamental de la dynamique il est facile de déterminer les nouvelles accélérations linéaire et angulaire des éléments discrets. Puis par intégration numérique les vitesses linéaires et angulaires sont calculées ainsi que la position et l'orientation. Le calcul des forces d'interactions entre les grains fait intervenir une phase primordiale qui consiste à détecter quelles particules vont interagir entre elles. Ici les interactions considérées ont lieu seulement lorsque deux particules sont en contact, il s'agit de détecter chaque collision afin de pouvoir générer ensuite les efforts liés à ce contact. La méthode des éléments discrets est une méthode explicite. L'interpénétration entre les grains est autorisée et c'est grâce à cela qu'il est possible de facilement détecter les contacts. Les lois d'interactions, l'intégration numérique et l'algorithme de détection des collisions seront détaillées dans les parties suivantes de ce chapitre.

2.1.2 Choix du code de calcul

Le choix du code de calcul pour la simulation de l'étalement de poudre est primordial puisqu'il s'agit de l'outil qui va suivre l'étude tout au long du travail. Il faut pouvoir connaître et maîtriser les modèles de comportement qui entrent en jeu dans la simulation. Pour cela, on préférera se baser sur un code open source qui garantit, en étudiant le code, que les différentes étapes du calcul sont connues et qui permet également de modifier le code directement pour y ajouter de nouveaux modèles. Le code de calcul choisi est un code basé sur la bibliothèque GranOO, développée en partie à l'I2M [81], ce qui permet également grâce à la proximité des développeurs

de se former rapidement à l'utilisation de cette bibliothèque.

GranOO est basé sur la méthode des éléments discrets et fournit toute une bibliothèque permettant de réaliser des simulations de milieux continus ou de milieux granulaires. Il est développé en C++, en programmation séquentielle et orientée objet. Il a principalement été utilisé pour l'étude du comportement de milieux continus jusqu'à maintenant mais est également tout à fait adapté à la simulation de milieux granulaires. De plus, son principe de fonctionnement permet facilement de mettre en place différentes configurations de simulation en modifiant les conditions limites ou la géométrie des différents éléments. En effet, un fichier d'entrée INP (input) suivant le format XML dicte au code les différentes étapes de la simulation : il est ainsi possible de facilement modifier ces étapes. La Figure 2.1 montre un exemple d'un fichier INP très simple permettant la simulation d'une pluie d'éléments discrets. La simulation générée par ce fichier demande un calcul en 20000 itérations avec un pas de temps de 2.10^{-5} secondes. La phase de pre-processing crée le domaine dans lequel vont évoluer les particules, ici il s'agit d'une boîte. Puis la phase de processing ajoute un élément discret à chaque itération, met les efforts appliqués aux particules à zéro, applique la force de gravité, gère les collisions particules/particules (« Discrete Element ») et particules/boîte (« Support Shape ») puis calcule la position, la vitesse et l'accélération des particules en fonction des forces appliquées.

```
<GranOO TotIteration="20000" TimeStep="2e-5" OutDir="Results"/>

<PreProcessing>
  <PlugIn Id="_NewSupportShape" Type="Box" DimX="1." DimY="0.25" DimZ="1."/>
</PreProcessing>

<Processing> <!-- The time loop -->
  <PlugIn Id="AddElement"/>
  <PlugIn Id="_ClearLoad"/>
  <PlugIn Id="_ApplyGravity" X="0." Y="-10." Z="0."/>
  <PlugIn Id="_ManageCollision" Between="DiscreteElement/SupportShape" ...some options here.../>
  <PlugIn Id="_ManageCollision" Between="DiscreteElement/DiscreteElement" ..some options here.../>
  <PlugIn Id="_IntegrateAcceleration" Linear="Yes" Angular="Yes"/>
</Processing>

</GranOO>
```

FIGURE 2.1 – Exemple d'un fichier INP pour un cas d'exemple

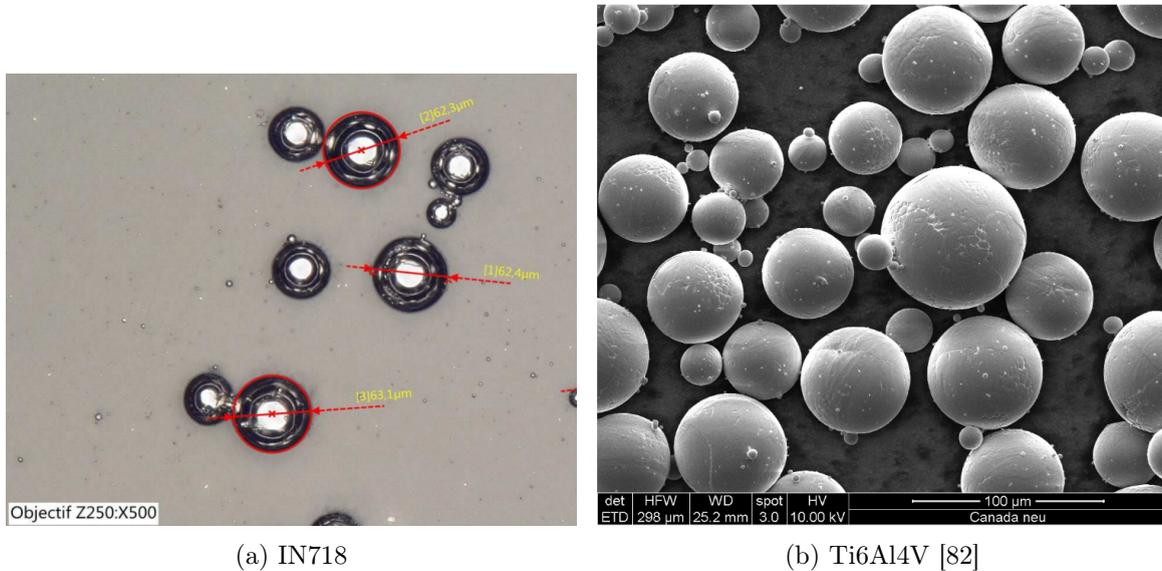
2.2 Description du modèle géométrique

Pour réaliser un code de calcul pour la simulation de l'étalement de la poudre il faut d'abord définir les principaux éléments qui interviennent dans le procédé et les modéliser de façon à obtenir un comportement réaliste. Les principaux éléments qui

composent le procédé sont la poudre, le racleur et la pièce en fabrication. Ainsi, il faut que les grains qui composent la poudre aient une forme et une taille qui correspondent avec un échantillon de poudre réel pour obtenir un écoulement semblable. La façon dont la poudre est disposée devant le racleur avant l'étalement peut éventuellement avoir un impact sur l'étalement. Plusieurs types de racleurs peuvent être utilisés en LBM, il faut pouvoir modéliser différentes géométries. Enfin, lorsque la poudre est étalée, elle est en contact avec de la poudre issue de la couche précédente ainsi que la surface de la pièce en fabrication. Il peut donc être important de modéliser la rugosité de surface de la pièce en fabrication.

2.2.1 Modélisation de la poudre

L'objectif de ce travail étant de comprendre le comportement de la poudre lors de l'étalement, il est primordial de modéliser les grains de la façon la plus représentative possible. Les grains des poudres étudiées dans ce travail (TA6V et IN718) sont très sphériques (Figure 2.2) par rapport à d'autres types de poudres également utilisés en fabrication additive (316L ou poudres polymères[66]) mais peuvent présenter des petites particules qui viennent s'accrocher à leur surface qu'on appelle satellites. Pour cette raison, le choix est fait de modéliser les grains par des sphères parfaites. Les éventuelles aspérités ou petits satellites à la surface des particules peuvent être modélisés lors du calcul des interactions entre les grains par la prise en compte d'un coefficient de frottement. Le fait de prendre en compte des particules parfaitement sphériques facilite la détection des contacts et permet d'économiser du coût de calcul pour la simulation finale.



(a) IN718

(b) Ti6Al4V [82]

FIGURE 2.2 – Particules très sphériques

L'autre aspect important à respecter dans la modélisation de la poudre concerne la distribution granulométrique. En effet la taille des particules est un paramètre essentiel dans le comportement de la poudre et la polydispersité des tailles de grains dans un échantillon joue un rôle majeur. Les études sur les milieux granulaires montrent en effet que les petites particules viennent combler les vides laissés par l'empilement des plus grosses pour obtenir une densité plus importante [83]. Un échantillon de poudre atomisée utilisé en fabrication additive a généralement une distribution de tailles semblable à une loi de probabilité log-normale [84] ou loi normale sauf besoin particulier spécifié au fabricant.

Par exemple, la loi normale est une loi de probabilité qui dépend de deux paramètres : la moyenne μ et l'écart-type σ . La densité de probabilité est définie par la fonction décrite dans l'équation 2.1.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.1)$$

Il s'agit de la fonction qui donne la courbe de Gauss. Ici elle définit le pourcentage de population de grains pour une taille donnée. La deuxième fonction importante qui intervient dans la modélisation de la distribution de tailles de grains est la distribution cumulative ou fonction de répartition décrite par l'équation 2.2. Cette fonction permet de réaliser des tirages aléatoires pour générer un échantillon de

particules comme décrit dans la suite.

$$F(x) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right) \quad (2.2)$$

Un outil a été développé en Python pour permettre de générer des échantillons de poudre afin de les intégrer directement dans la simulation. Cet outil permet la génération d'échantillon de poudre à partir de différentes lois de probabilité telles que la loi normale, la loi log-normale, la loi de Weibull ou encore une combinaison de lois normales ainsi que des paramètres de ces lois. Il permet également d'importer des fichiers de mesures réelles d'échantillons par morphogranulomètre. En effet, l'appareil permet d'obtenir la distribution granulométrique d'un échantillon de poudre en détectant le pourcentage de population appartenant à chaque classe de tailles de particules. Une classe de taille de particules est une plage de valeurs de diamètre de particules. Ainsi le morphogranulomètre détecte chacune des particules passant devant le capteur et calcule son diamètre. Pour un échantillon donné, plus il y a de classes, plus la mesure permet de générer un échantillon dont la distribution granulométrique est proche de celle mesurée expérimentalement. Le résultat de la mesure est donné dans un fichier à deux colonnes contenant la classe de taille et le pourcentage de population correspondant. A partir de ces fichiers, il est possible de choisir une loi de probabilité dont les paramètres seront optimisés pour correspondre au mieux à ces données ou bien directement générer un échantillon numérique à partir des mesures. Cette dernière option est la plus efficace pour simuler le comportement d'un échantillon de poudre réel car elle permet de respecter exactement le profil de la courbe de densité de probabilité. La méthode utilisée consiste à récupérer la fonction de densité cumulative (cdf) de la mesure qui indique pour chaque taille de particule, le pourcentage de particules qui ont une taille inférieure à cette taille donnée. Puis, pour générer une particule, il s'agit de tirer un pourcentage aléatoirement et de récupérer la taille qui correspond à ce pourcentage. On répète ce processus tant que la quantité de particules ou la masse totale n'est pas atteinte. La Figure 2.3 montre une capture de ce logiciel avec les différentes méthodes de génération d'échantillon de poudre illustrées. Les courbes bleues représentent les données mesurées expérimentalement, la courbe et l'histogramme oranges montrent les données générées à partir des mesures, enfin les courbes vertes montrent un exemple de distribution (ici une loi double normale) dont les paramètres ont été optimisés pour correspondre aux données.

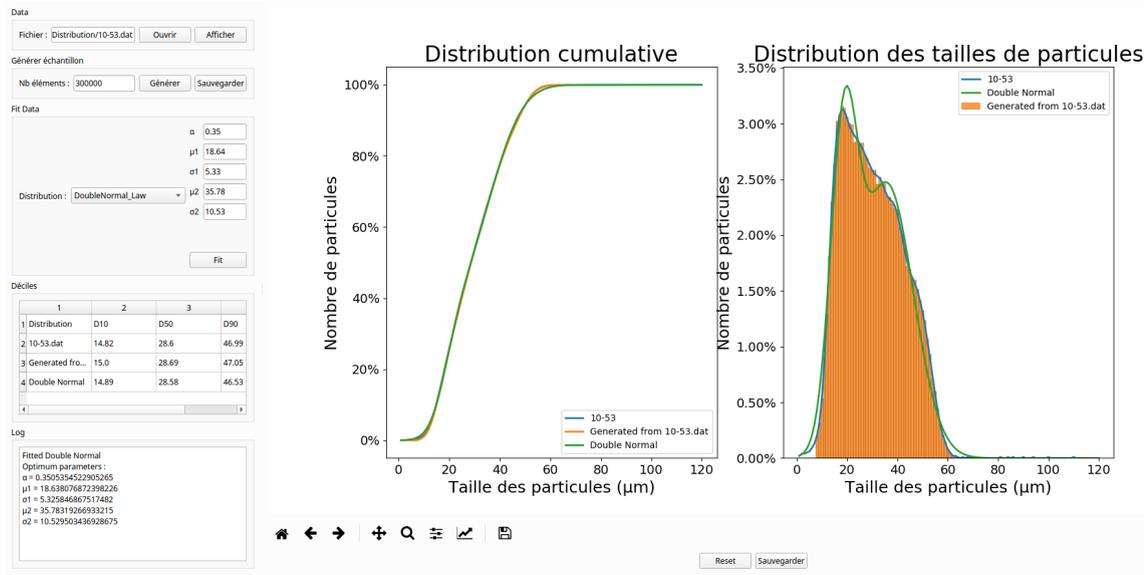


FIGURE 2.3 – Outil de génération d'échantillon numérique

2.2.2 Modélisation du procédé

2.2.2.1 Système de mise en couche

Le procédé d'étalement de poudre fait intervenir plusieurs éléments qu'il est important de prendre en compte dans la simulation. Le premier élément jouant un rôle majeur est évidemment le racleur qui doit récupérer la poudre, la pousser et la déposer dans la zone de fabrication. Selon les machines, il peut être rigide ou souple, en métal ou silicone. Il peut être sous forme de rouleau, de lame ou de brosse. Dans ce travail, on suppose qu'il y a peu de différence entre un racleur souple et un racleur rigide vu la faible quantité de poudre étalée à chaque couche. Ainsi, quelle que soit la géométrie, le racleur sera supposé parfaitement rigide.

Deux méthodes sont possibles pour modéliser le racleur avec le code utilisé. Il est possible d'utiliser un tool comme le permet GranOO : il s'agit alors d'une forme géométrique solide comme un cylindre pour modéliser un rouleau ou un parallépipède rectangle pour une lame par exemple. La seconde méthode consiste à modéliser la géométrie du racleur par un ensemble d'éléments discrets agencés tels que la forme générale de l'ensemble forme un racleur. L'avantage de cette méthode est qu'il est possible de créer des formes plus complexes que des formes basiques ainsi que de générer une certaine rugosité à la surface du racleur. En revanche, cela demande un nombre d'éléments discrets non négligeable qui impacte le temps de simulation. Cette méthode sera explicitée plus en détail dans la section sur la rugosité de surface.

La Figure 2.4 montre un exemple d'une forme plus complexe qui peut être obtenue en utilisant la méthode d'assemblage d'éléments discrets.



FIGURE 2.4 – Méthode de modélisation de la géométrie du racleur

2.2.2.2 Alimentation en poudre

Selon les machines, l'alimentation en poudre se fait différemment. Pour certaines, la quantité de poudre nécessaire est versée devant le racleur, pour d'autres, la poudre est stockée dans un bac d'alimentation qui s'élève de la hauteur nécessaire pour laisser dépasser la quantité de poudre à étaler. La simulation de l'étalement de poudre s'effectue en deux étapes : la première consiste à générer la poudre. Pour cela, les grains de poudre sont disposés au-dessus de la zone d'alimentation comme le montre la Figure 2.5 puis la simulation est lancée pour les laisser tomber et former un tas de poudre prêt à être étalé. La deuxième étape est l'étalement de la poudre dans la zone de fabrication.

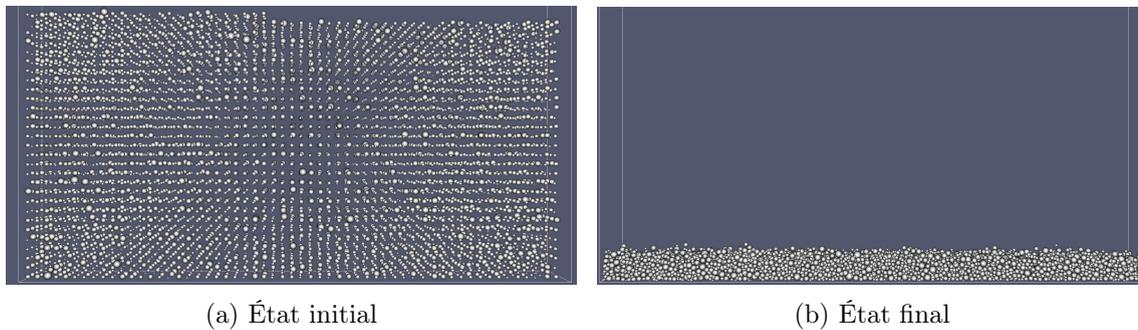


FIGURE 2.5 – Génération de la poudre par pluvination (vidéo)

La génération de la poudre est proche du cas où la poudre tombe devant le racleur. Dans l'autre cas, le bac d'alimentation est d'abord rempli de poudre par le haut, il est donc supposé que l'état initial de la poudre est le même selon les deux méthodes.

2.2.2.3 Paramètres procédé

Il est possible de faire varier plusieurs paramètres liés à l'étalement de la poudre lors d'une fabrication comme l'épaisseur de lit de poudre par exemple. C'est un paramètre très important qui a un impact direct sur la phase de fusion laser et sur la qualité finale de la pièce. Un autre paramètre important est celui du dosage. Pour être sûr d'étaler de la poudre sur la totalité du volume de la zone de fabrication, un paramètre de dosage réglé à plus de 100% afin d'emporter une quantité de poudre supérieure à celle censée être étalée, quitte à la récupérer à la fin de l'étalement.

Dans le code de calcul, il est possible de jouer sur ces deux paramètres, la quantité de poudre à générer étant calculée à partir du volume théorique à remplir en fonction de l'épaisseur du lit de poudre choisie et du paramètre de dosage. Un autre paramètre pris en compte est l'espace entre le racleur et le lit de poudre. En effet, le racleur est légèrement surélevé par rapport à l'épaisseur de couche souhaitée afin de ne pas heurter d'éventuels morceaux de matière solidifiée qui se trouveraient sur la course du racleur et qui pourraient l'endommager. Cet espace est généralement de l'ordre de grandeur de l'épaisseur d'une feuille de papier soit environ 60 microns. Ce paramètre est également pris en compte dans la simulation.

2.2.3 Rugosité de surface

La première couche de poudre est étalée sur un plateau. Ce plateau a une certaine rugosité de surface qu'il peut être nécessaire de modéliser. Les couches suivantes sont étalées sur des zones de poudre non fondues ainsi que sur des zones fondues qui forment la pièce en fabrication. La matière fondue (puis solidifiée) présente une rugosité de surface qu'il est important de modéliser car le comportement des grains qui évoluent sur cette surface est impacté par la rugosité.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour prendre en compte cette rugosité dans la simulation de l'étalement. La première consiste à déposer une quantité de poudre dans la zone de fabrication et fixer les éléments discrets qui la composent. C'est une façon de modéliser qui ne prend pas en compte la phase de fusion laser qui va créer une rugosité différente de celle du lit de poudre déposé. La couche suivante est alors étalée sur une surface rugueuse. Les éléments discrets fixés permettent de générer des efforts sur la poudre mais ne sont pas impactés par ces efforts. Cette méthode permet de créer une rugosité irrégulière mais ne permet pas vraiment de contrôler les paramètres de rugosité. La Figure 2.6 illustre une surface rugueuse générée avec cette méthode.

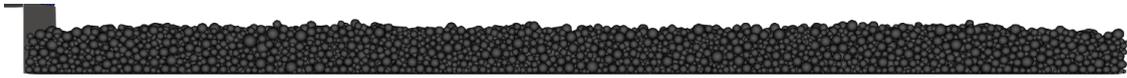


FIGURE 2.6 – Surface rugueuse générée par pluvination (Vue de côté)

Une autre méthode envisagée consiste à disposer régulièrement des éléments discrets côte à côte afin de créer une forme géométrique comme c'est le cas pour la génération du racleur. La Figure 2.7 montre le résultat de cette méthode. L'avantage est qu'il est possible de contrôler les paramètres de rugosité en faisant varier la taille des éléments discrets ou l'interpénétration entre eux. En revanche, cela crée une rugosité régulière alors que la rugosité de la pièce en fabrication est plus aléatoire.

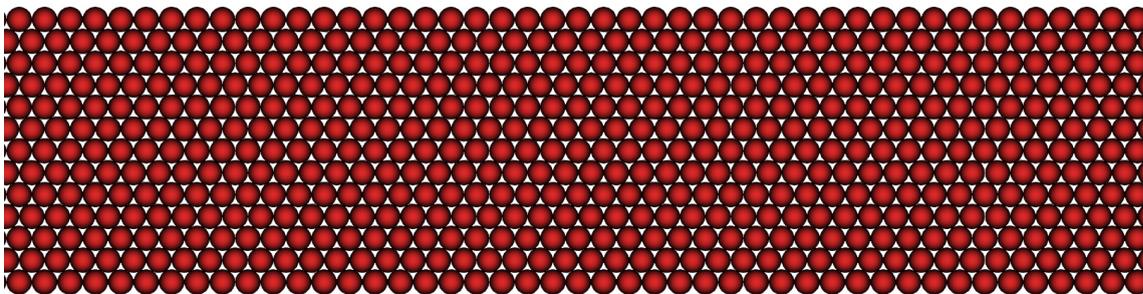
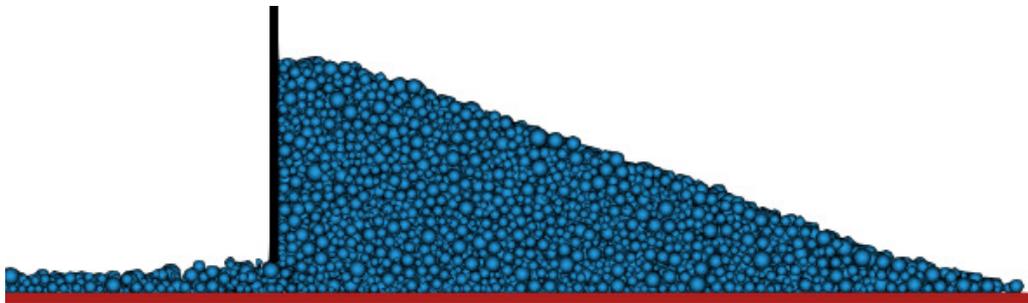


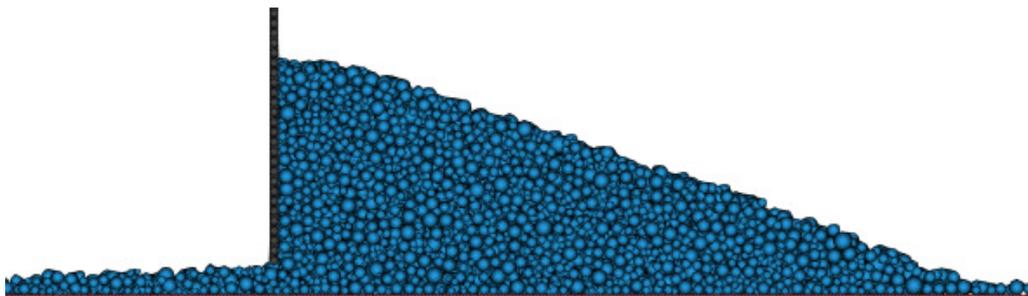
FIGURE 2.7 – Plateau rugueux (Vue de dessus)

Pour simuler la rugosité de surface, Nan et al [67] ont choisi d'utiliser des cylindres disposés côte à côte. Cependant cette méthode ne permet de prendre en compte la rugosité seulement dans le sens de l'étalement. L'utilisation de sphères permet d'obtenir une rugosité dans les deux directions et est moins restrictive sur le comportement des grains.

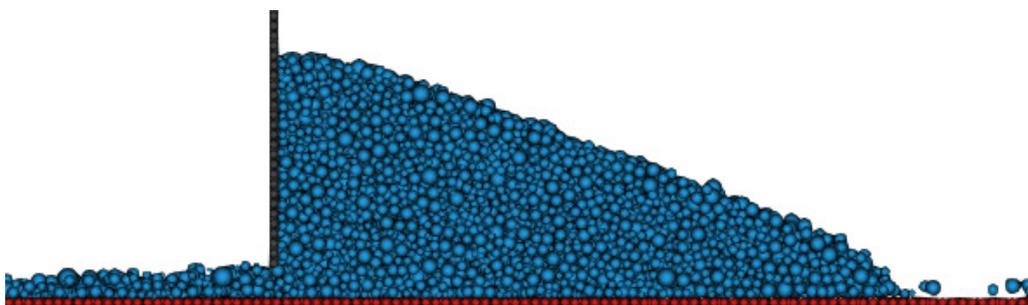
Des simulations ont été réalisées avec différents diamètres d'éléments discrets pour mettre en évidence l'influence de la rugosité de surface sur les propriétés de l'écoulement de la poudre et du lit de poudre. Pour comparer les résultats, la densité du lit de poudre est calculée par le rapport entre le volume de matière et le volume du parallélépipède contenant le lit de poudre. La figure 2.8 montre l'impact de la rugosité de surface sur l'étalement de la poudre, l'angle du tas de poudre devant le racleur augmentant à mesure que la rugosité de surface augmente. La rugosité de surface affecte l'écoulement de la poudre donc probablement la qualité finale du lit de poudre. Pour les études suivantes, la rugosité de surface est simulée avec des particules d'un diamètre de $30\ \mu m$ car cela forme une rugosité de $R_a = 8\ \mu m$, du même ordre de grandeur que celle de la surface fusionnée de la couche précédente [85, 86].



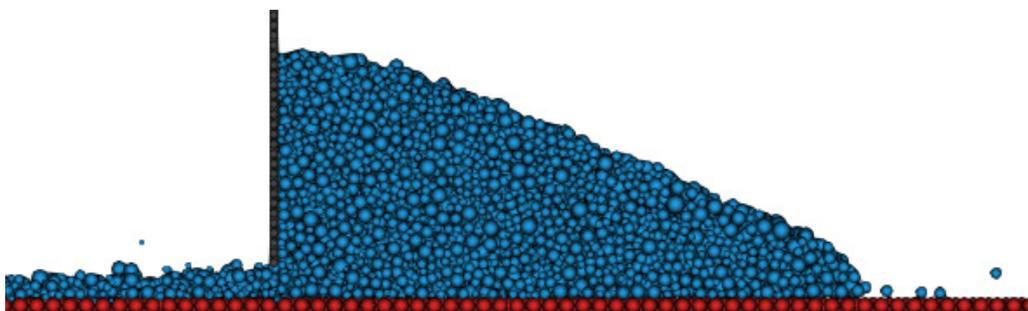
(a) plateau lisse



(b) $\varnothing = 7 \mu m$



(c) $\varnothing = 30 \mu m$



(d) $\varnothing = 50 \mu m$

FIGURE 2.8 – Influence de la rugosité de surface

2.3 Description du modèle de comportement

Afin d'obtenir un comportement réaliste de la poudre, il faut pouvoir gérer les contacts entre les particules en générant des forces décrites par les lois d'interactions des modèles choisis. Une fois les efforts générés pour chaque particule, il faut ensuite passer à l'intégration numérique pour calculer le mouvement de chaque grain individuel à partir des efforts et du principe fondamental de la dynamique.

2.3.1 Lois d'interactions entre les grains

Le principe de cette méthode est représenté sur les figures 2.9 et 2.10 par le contact entre deux particules avec des vitesses données. Les forces générées par le contact sont représentées par les composantes normale et tangentielle de la force totale résultante (Figure 2.9). Les forces générées par le contact peuvent entraîner des couples et des mouvements de rotation des particules (Figure 2.10). Ici, il y a une régularisation de la force de répulsion en acceptant une faible interpénétration δ . C'est une caractéristique notable de cette méthode numérique.

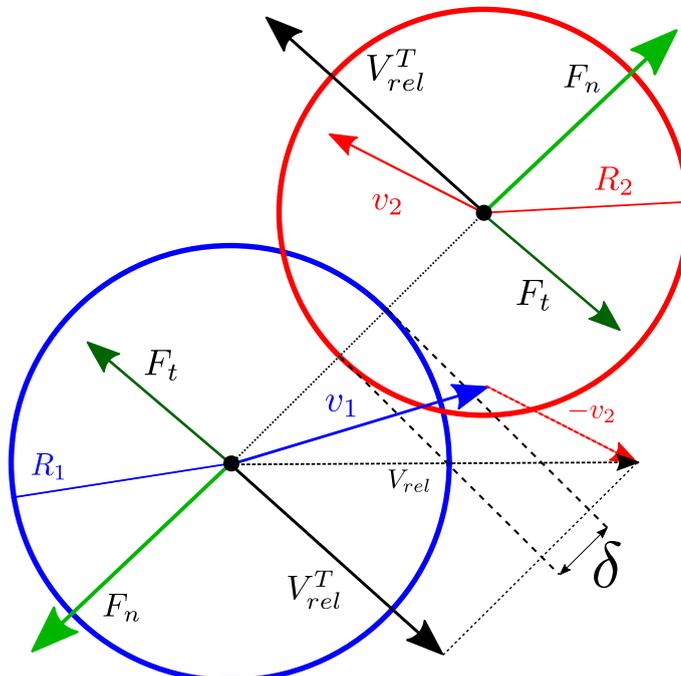


FIGURE 2.9 – Schéma d'un contact en DEM

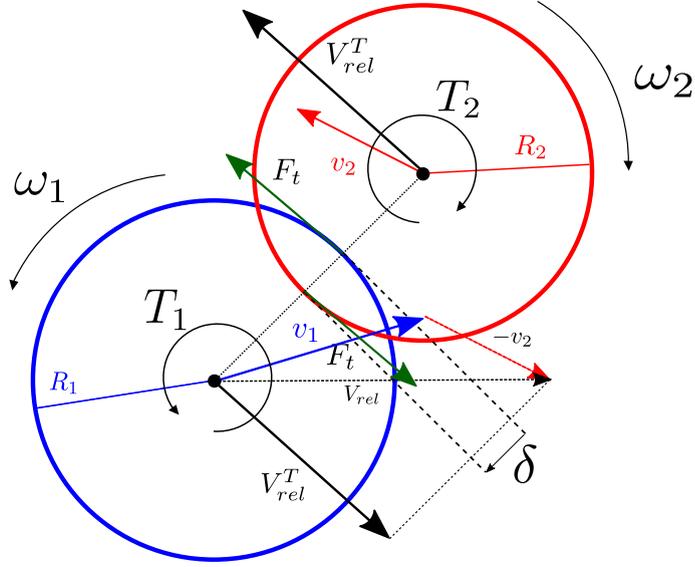


FIGURE 2.10 – Mouvement angulaire

Lorsqu'un contact se produit entre deux corps, une force de répulsion est générée dans la direction normale au contact. Il y a également de la dissipation d'énergie qui est prise en compte avec un coefficient d'amortissement. Il peut également y avoir une force qui tend à maintenir le contact entre les corps s'ils sont adhésifs. Enfin, une force de friction est appliquée si la vitesse relative entre les deux corps n'est pas colinéaire à la direction du contact. Ces quatre forces sont détaillées ci-dessous :

Force de répulsion : Modélisation de la raideur de contact entre deux grains (équation (2.3)). C'est une force normale au contact.

$$\vec{F}_r = k\delta\vec{n} \quad (2.3)$$

où k est la raideur de contact (N/m), $\delta = R_1 + R_2 - d_{12}$ est l'interpénétration entre les grains, avec R_1 et R_2 les rayons des particules et d_{12} la distance entre leurs centres, $\delta < 0$ quand il y a un contact.

Dissipation d'énergie : Lorsqu'il y a un contact, une partie de l'énergie est dissipée. Le modèle choisi pour le représenter est décrit par l'équation (2.4) :

$$\vec{F}_d = 2\alpha\sqrt{kM}V_{rel}\vec{n} \quad (2.4)$$

où α est le coefficient de dissipation, M la masse réduite des deux grains en contact, V_{rel} la vitesse relative des deux particules. Ce modèle permet de relier facilement le coefficient de dissipation au coefficient de restitution ϵ souvent utilisé dans les

problèmes granulaires avec la relation $\alpha = \frac{1}{\sqrt{1+(\frac{\pi}{ln(\epsilon)})^2}}$ [87, 88].

Adhésion : Différents phénomènes d'adhésion peuvent générer des forces attractives entre les grains comme les forces de Van der Waals ou les ponts liquides par exemple. Lorsque deux corps sont en contact, il y a une énergie de surface qui crée une force d'attraction entre eux. Les modèles JKR [71], DMT [72] et ponts liquides [89] sont des modèles utilisés pour modéliser l'adhésion et ont tous la même forme : il s'agit d'un coefficient (qui varie selon le modèle) multiplié par une énergie de surface (ou tension superficielle pour les ponts liquides) et par le rayon de la particule. Le modèle choisi pour représenter ce phénomène se base sur ces trois modèles mais ne fait intervenir que le coefficient γ et le rayon de la particule. Il est décrit par l'équation (2.5). Ainsi le coefficient γ représente une certaine énergie d'adhésion qu'il faut déterminer par l'expérience. Il n'est pas possible ou très difficile de mesurer expérimentalement l'énergie d'adhésion entre deux grains expérimentalement car les grains sont extrêmement petits, il faut pour cela envisager des essais sur un ensemble de grains plus facile à manipuler à l'échelle humaine. L'objectif sera donc de déterminer la quantité γ .

$$\vec{F}_a = \gamma R^* \vec{n} \quad (2.5)$$

avec γ l'énergie d'adhésion (J/m^2) et $R^* = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ (m) le rayon équivalent correspondant aux deux grains. Comme montré dans la suite, il est difficile de prédire théoriquement la valeur de ce coefficient. Une étude sur un modèle analytique est présentée dans le chapitre 3. L'objectif de ce modèle est de pouvoir prendre en compte tous les effets attractifs auxquels peuvent être soumis les grains à travers un coefficient dont la valeur doit être déterminée expérimentalement. Même si les modèles JKR et DMT sur lesquels se base le modèle proposé sont issus de la théorie du contact de Hertz, il n'est pas nécessaire d'utiliser le modèle de répulsion de la loi de Hertz car le modèle de répulsion n'a pas d'effet sur le résultat de la simulation.

Frottements : Lorsque deux corps sont en contact et en mouvement, une force s'oppose au déplacement relatif tangentiel de chaque corps. C'est la friction qui est simulée par la loi de Coulomb [90] (équation (2.6)). Ce modèle pourrait également permettre de prendre en compte les défauts de surface ou les particules satellites fixées autour des grains de poudre [39], augmentant artificiellement la friction macroscopique entre deux grains.

$$\vec{F}_t = -\mu (V_{rel}^T) \|\vec{F}_n\| \vec{t} \quad (2.6)$$

avec μ le coefficient de frottements qui est une fonction dépendant de V_{rel}^T la vitesse

relative tangentielle entre les particules en contact et $\vec{F}_n = \vec{F}_r + \vec{F}_d + \vec{F}_a$ ¹.

Le point d'application de cette force est au niveau du contact entre les particules. Puisque sa direction est tangentielle, cela induit un couple calculé par l'équation 2.7.

$$\vec{T}_t = \vec{OC} \wedge \vec{F}_t \quad (2.7)$$

avec \vec{OC} le vecteur entre le centre de la particule et le point de contact.

Le coefficient de frottements μ dépend de la vitesse relative des deux corps en contact. Si la projection tangentielle de la vitesse relative est positive alors le coefficient de frottements est égal à $+\mu$, sinon si elle est négative alors il est égal à $-\mu$ (Figure 2.11). Lorsque la vitesse relative tend vers zéro, la fonction est discontinue et doit être régularisée. \vec{t} est le vecteur tangentiel au contact.

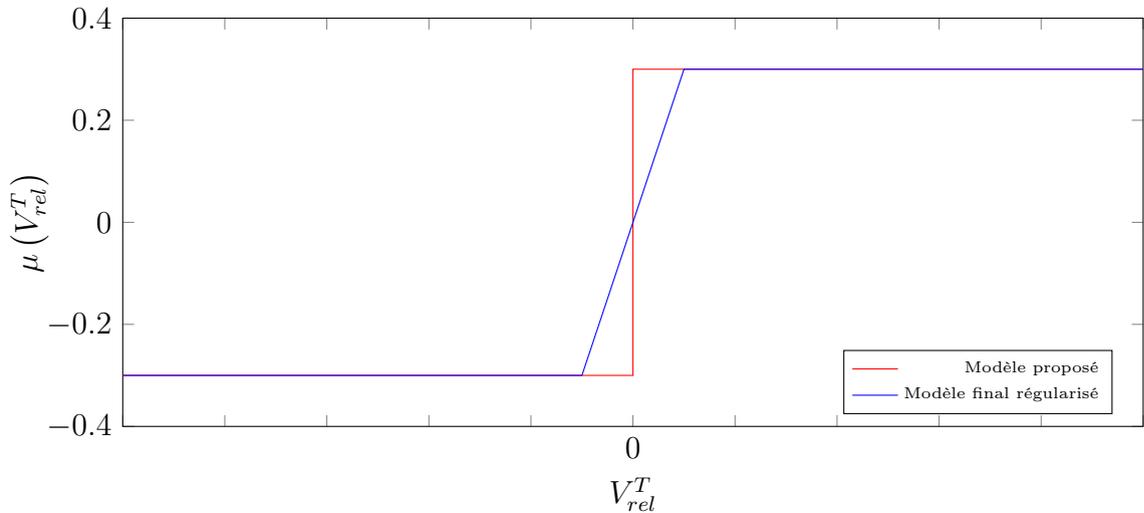


FIGURE 2.11 – Régularisation du modèle de frottement

2.3.2 Intégration numérique du mouvement

Afin de déterminer le mouvement des particules, l'accélération d'une particule peut être calculée à partir de la masse et de la somme des forces qui s'exercent (forces d'interaction et poids) sur celle-ci. La vitesse et la position sont alors calculées à

1. Cette relation contient une erreur détectée lors de la soutenance et des discussions avec les membres du jury. Les résultats présentés dans la suite du manuscrit correspondent malgré tout à des calculs utilisant l'équation telle quelle, il a donc été décidé de la conserver dans le manuscrit. la force d'adhésion ne doit en fait pas être prise en compte dans le calcul de la force normale comme décrit notamment par Richefeu et al [91]. Pour le lecteur souhaitant reprendre ces calculs, il faudra lire $\vec{F}_n = \vec{F}_r + \vec{F}_d$. Cependant, cette erreur n'impacte pas les résultats énoncés dans ce manuscrit comme justifié dans le chapitre 3. L'effet du frottement reste ainsi négligeable dans les cas d'étude d'étalement.

partir de l'accélération à partir du schéma d'intégration Verlet-Vitesse [92, 93] décrit par l'équation (2.8)

$$\begin{cases} a_{n+1} &= \sum \vec{F} / M \\ v_{n+1} &= \frac{1}{2} \Delta t (a_{n+1} + a_n) \\ p_{n+1} &= v_{n+1} \Delta t + a_{n+1} \frac{\Delta t^2}{2} \end{cases} \quad (2.8)$$

où a est l'accélération, v la vitesse, p la position, M la masse de la particule et $\sum \vec{F}$ est la somme des forces appliquées à la particule.

L'accélération et la vitesse angulaire sont également calculées pour obtenir les mouvements de rotation des particules. Ceci est réalisé par l'intermédiaire de quaternions qui permettent de réaliser des calculs de rotations très rapidement. L'accélération angulaire est donnée par l'équation (2.9) [81, 94].

$$\alpha_{n+1} = \omega_n \bullet \bar{\theta}_n \bullet \omega_n + \frac{1}{2} \theta_n \left[I^{-1} \left(\sum \vec{T} - 4(\bar{\theta}_n \bullet \omega_n) \wedge I.(\bar{\theta}_n \bullet \omega_n) \right) \right] \quad (2.9)$$

où α est l'accélération angulaire, ω la vitesse angulaire, θ l'orientation, I le moment d'inertie de la particule et $\sum \vec{T}$ la somme des couples appliqués à la particule. Puis la vitesse angulaire et la rotation peuvent être calculées avec le schéma d'intégration Verlet vitesse comme le montre l'équation (2.10).

$$\begin{cases} \omega_{n+1} &= \frac{1}{2} \Delta t (\alpha_{n+1} + \alpha_n) \\ \theta_{n+1} &= \omega_{n+1} \Delta t + \alpha_{n+1} \frac{\Delta t^2}{2} \end{cases} \quad (2.10)$$

Le pas de temps utilisé dans la simulation doit être inférieur au temps de contact entre deux particules pour garantir une intégration numérique stable. On définit le pas de temps critique comme le plus petit temps de contact entre deux particules. Le pas de temps critique est déterminé par la relation $\Delta t_{crit} = \sqrt{\frac{m_{min}}{k}}$ [95, 96] à partir de la fréquence de vibration du contact. Pour des raisons de stabilité numérique, il est conseillé de prendre un pas de temps $\Delta t \leq 0.17 \Delta t_{crit}$ pour une simulation 3D [95]. Dans la suite du travail, on prend $\Delta t = 0.15 \Delta t_{crit}$.

2.4 Optimisations numériques

2.4.1 Méthode de détection des contacts

La détection des contacts est la phase qui est la plus coûteuse en temps de calcul à chaque itération. Il est alors absolument nécessaire d’avoir une méthode de détection de contact optimale. Dans la simulation de l’étalement de poudre, il y a plusieurs éléments qui entrent en jeu : les particules de poudre qui peuvent se mouvoir librement et des éléments géométriques modélisant des plateaux ou racleurs. Dans GranOO, les particules de poudre sont appelées des éléments discrets, les autres éléments géométriques sont appelés des tools.

Les éléments discrets et les tools ayant généralement des formes de nature très différente, il est important de dissocier la détection de contact entre ces deux types de géométries. Du fait du nombre important de particules à simuler, la détection de contacts entre les éléments discrets et celle qui est la plus coûteuse. Pour détecter un contact entre deux particules sphériques, il suffit de tester si la condition suivante est vérifiée : $R_1 + R_2 > \|\overrightarrow{O_1O_2}\|$ avec R_1 et R_2 les rayons des particules et $\|\overrightarrow{O_1O_2}\|$ la distance entre le centre de ces particules. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser cette détection de contacts : la première consiste à chercher pour chaque particule, l’ensemble des autres particules qui est en contact avec celle-ci. Il s’agit de la méthode la plus simple à mettre en œuvre, mais elle n’est vraiment pas efficace. En effet, la complexité de cet algorithme est en $O(n^2)$. La méthode actuellement utilisée est la méthode LCM (Linked Cells Method) [97] qui consiste dans une première phase à générer une grille 3D occupant tout l’espace occupé par l’ensemble des particules et dont la taille de cellule correspond au diamètre de la plus grosse particule. Le but étant de minimiser le nombre de particules par cellule. Puis dans une deuxième phase, il s’agit de parcourir toutes les cellules et de détecter les contacts entre les particules de cette cellule et des cellules voisines. La Figure 2.12 schématise en 2D le fonctionnement de cette méthode. La cellule rouge est la cellule sélectionnée au bout de plusieurs itérations, Les cellules vertes sont les cellules voisines dont la détection de contact n’a pas encore été effectuée. Dans ce cas-là, la première itération étudiait la cellule tout en bas à gauche, puis la cellule à sa droite à la deuxième itération, etc. C’est pourquoi toutes les cellules voisines ne sont pas identifiées en vert puisque les collisions entre la cellule rouge et les cellules voisines qui ne sont pas identifiées en vert ont déjà été effectués au cours des itérations précédentes.

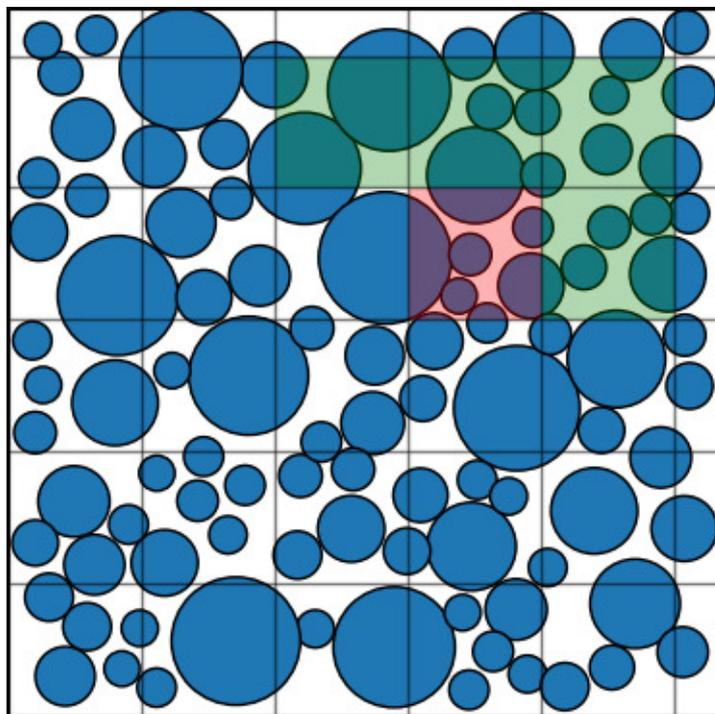


FIGURE 2.12 – Schéma de la méthode LCM

La méthode LCM trouve son efficacité lorsque les particules ont une taille similaire. En effet, puisque la taille de cellule de la grille dépend de la plus grosse particule, si toutes les particules ont une taille similaire, alors il y aura peu de particules dans chaque cellule. En revanche, si les tailles de particules sont très différentes dans l'échantillon étudié, alors la taille de cellule est grande et il y aura beaucoup de particules à l'intérieur.

La poudre métallique utilisée en fabrication additive a généralement des particules dont la taille peut varier d'un facteur 10. Ce n'est donc pas la configuration optimale pour obtenir les meilleures performances de calcul. Pour cette raison, une autre méthode a été étudiée, il s'agit de la méthode HGrid (Hierarchical Grid) [98, 99]. Celle-ci consiste à élaborer différents niveaux de grilles, adaptées aux tailles de particules de l'échantillon de particules. Par exemple, avec deux niveaux de grilles, il y aurait une grille dont les cellules feraient la taille de la plus grosse particule de l'échantillon (comme pour la grille de la méthode LCM) et une autre grille dont les cellules feraient la moitié de cette taille. Ensuite, il suffit de détecter les contacts dans chaque grille comme pour la méthode LCM puis vient la phase de détection de contacts entre les différents niveaux de grille. Comme l'indiquent Ogarko et al [98, 99], il y a deux façons de procéder à la détection de contacts entre différents niveaux de grilles : la méthode Top-Down et la méthode Bottom-Up. La méthode

Top-Down qui consiste à parcourir chaque niveau de grille et de chercher des contacts seulement sur les niveaux inférieurs à cette grille. La méthode Bottom-Up est exactement l'inverse. La Figure 2.13 montre un schéma de la méthode HGrid à deux niveaux pour un échantillon bidisperse.

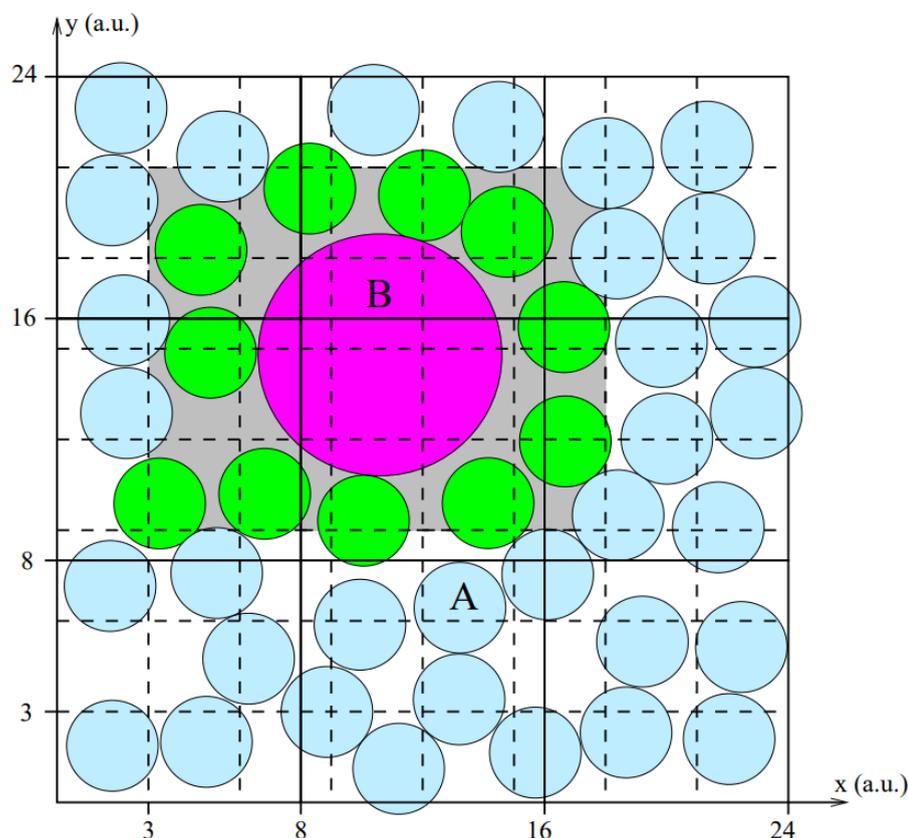


FIGURE 2.13 – Schéma de la méthode HGrid [98]

La méthode HGrid a d'abord été développée en Python, ce qui permet un développement rapide, pour tester son efficacité sur des échantillons de particules semblables à ceux utilisés dans la simulation d'étalement de poudres métalliques. Les résultats sont très satisfaisants comme le montre le tableau 2.1 : la méthode est plus efficace notamment lorsqu'on utilise deux et trois niveaux de grille (gain de 40% de temps de calcul). La variante utilisée pour générer ces résultats étant l'algorithme Top-Down qui permet d'obtenir de meilleures performances. La variante Top-Down est une méthode de détection des contacts entre les particules de niveaux de grille différents. Il s'agit de parcourir les particules les plus grosses pour chercher les contacts avec les particules plus petites. L'autre variante est nommée Bottom-Up et consiste à l'inverse à parcourir les petites particules pour détecter les contacts avec les plus grosses.

Méthode	LCM	HGrid
1 niveau	51 s	50 s
2 niveaux		31 s
3 niveaux		31 s
4 niveaux		40 s

TABLE 2.1 – Comparaison des performances entre la méthode LCM et la méthode HGrid sur un même échantillon

Les résultats sont intéressants lorsque deux ou trois niveaux de grille sont utilisés. Cependant, la complexité de mise en œuvre dans le code C++, les difficultés rencontrées et le fait que la différence d'ordre de grandeur ne soit pas si importante en pratique font que la priorité a été mise sur d'autres développements pour mener à bien ce travail.

Enfin, il y a également la détection de contacts entre les éléments discrets et les tools. Les tools étant des formes géométriques quelconques et de grande taille, la méthode utilisée consiste à simplement tester le contact avec chaque particule.

2.4.2 Conditions périodiques

Plus il y a de particules dans la simulation, plus le temps de calcul est long. Afin de ne pas avoir à simuler une quantité de poudre trop importante, des conditions périodiques sont mises en place sur les bords dans la largeur. La taille du domaine est choisie de sorte à ce que la largeur soit environ dix fois la taille d'une particule. De cette façon, la taille du domaine n'influe pas sur le comportement de la poudre. Pour mettre en place les conditions périodiques dans un milieu granulaire, il y a deux cas à prendre en compte. Lorsqu'une particule se trouve proche d'un bord, il faut tester si elle se trouve en contact avec une particule de l'autre bord. Pour cela, la particule est virtuellement déplacée de l'autre côté en effectuant une translation d'une longueur égale à la largeur du domaine et le contact peut être testé. S'il y a effectivement contact, il faut alors appliquer les différentes forces qui interviennent lors d'un contact puis la particule est de nouveau translaturée à sa position originelle. Le deuxième cas concerne le passage d'une particule d'un bord à l'autre. Dès que le centre d'une particule dépasse un bord du domaine, il faut déplacer la particule de l'autre côté du domaine. Il y a deux zones importantes par bord comme le montre la Figure 2.14. La zone verte concerne les particules qui sont suffisamment proches du bord pour qu'il soit possible qu'il y ait un contact avec une particule de l'autre bord. Les particules bleues sont dans cette situation. La zone rouge concerne les

particules qui dépassent le bord comme c'est le cas de la particule rouge. Il faut alors tester le contact avec les particules des zones rouges et vertes de l'autre bord. Pour récapituler, il faut tester le contact entre les particules de la zone rouge du bord haut avec les zones rouge et verte du bord bas, il faut tester les particules de la zone verte du bord haut avec la zone rouge du bord bas, enfin il faut tester les particules de la zone rouge du bord bas avec la zone verte du bord haut.

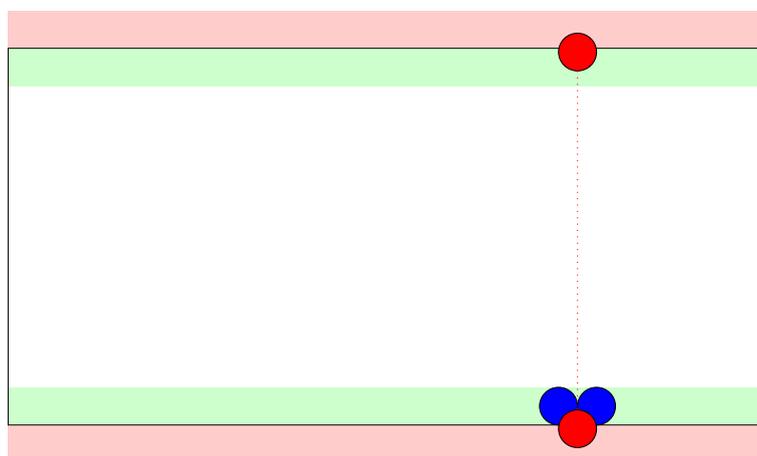


FIGURE 2.14 – Conditions périodiques

La méthode de détection de contact utilisée pour réaliser les simulations étant la méthode LCM, il a fallu développer l'algorithme de gestion des conditions périodiques en utilisant la méthode LCM. C'est globalement le même principe que la méthode LCM sauf que la grille ne couvre que les zones vertes et rouges sur la figure 2.14. Il n'y a donc que quatre étages dans la direction des conditions périodiques. Ces quatre étages correspondent aux zones rouges et vertes. De plus, contrairement aux conditions périodiques normales, ici il est nécessaire de tester les contacts avec toutes les cellules "voisines" de l'autre bord. En effet, avec la méthode LCM standard, il n'est pas nécessaire de tester les contacts entre les paires de cellules voisines qui ont déjà été testées lors du parcours des cellules précédentes.

2.5 Choix du domaine d'étude

Pour réaliser cette étude, toutes les simulations sont calculées avec la même géométrie de base illustrée sur la figure 2.15. Elle contient un premier plateau où la poudre est insérée avant le démarrage de l'étalement (grains bleus) et la zone de fabrication sur laquelle la poudre est étalée (plateau de fabrication ou surface fusionnée). La zone de fabrication est disposée un peu plus bas que le premier plateau

afin de correspondre à l'épaisseur de couche souhaitée. Dans cette étude, l'étalement de la poudre est étudié exclusivement sur une surface rigide et rugueuse. Il n'y a pas d'étalement sur une couche de poudre précédente non fondue. Le racleur est une lame supposée infiniment rigide avec une vitesse V .

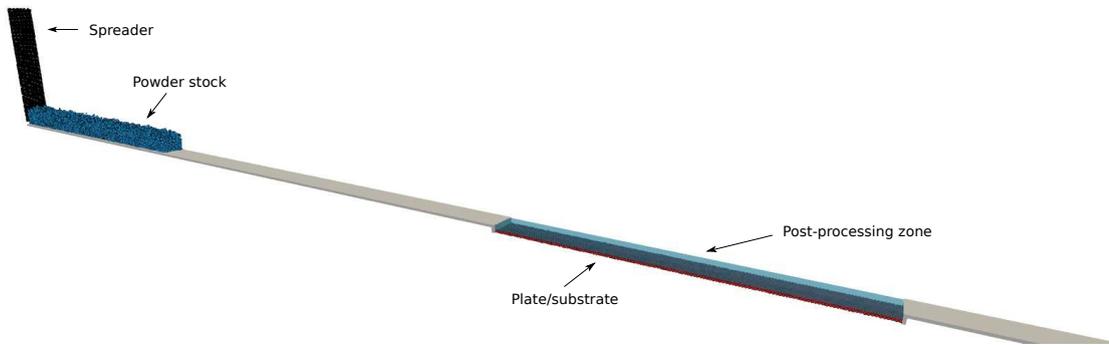


FIGURE 2.15 – Domaine d'étude

Dans la zone de fabrication, une couche est déjà existante (rouge) afin de simuler la rugosité de surface de la couche précédente fondue. La couche rouge contient des éléments discrets qui ne peuvent pas bouger. Elle permet de simuler la rugosité de surface de la plaque ou du substrat. Une surface fondue a une rugosité de l'ordre de grandeur de la taille des grains, donc la surface irrégulière créée par les éléments discrets permet d'approcher la rugosité réelle du substrat. Des conditions limites périodiques sont appliquées dans la direction transversale afin de simuler une largeur infinie. La largeur du domaine de calcul est de $300\ \mu\text{m}$, ce qui représente environ dix fois la taille d'une particule de taille moyenne. La longueur du plateau est de 1cm. Le domaine étudié est relativement petit afin de limiter le nombre d'éléments discrets car la méthode numérique est très coûteuse en mémoire informatique et en temps de calcul. Néanmoins, cette longueur est suffisamment longue pour observer le comportement global de la poudre lors de l'étalement. Le matériau pris en compte pour cette étude est une poudre métallique de IN718 dont les grains de poudre sont très sphériques. Les simulations sont réalisées avec des grains sphériques ayant une distribution de taille qui suit une loi normale avec un diamètre de $30\ \mu\text{m}$ et un écart-type de $10\ \mu\text{m}$ qui est similaire aux échantillons de poudre IN718 mesurés. Par exemple, le tableau 2.2 compare une mesure de déciles d'échantillons de poudre IN718 vierge rapportée par Nguyen et al [100] avec la distribution numérique de la taille des particules.

Échantillon	D_{10}	D_{50}	D_{90}
Réel	$21 \mu m$	$31 \mu m$	$49 \mu m$
Numérique	$20 \mu m$	$31 \mu m$	$43 \mu m$

TABLE 2.2 – Déciles d'un échantillon d'inconel 718

Chaque couche comporte environ 100 000 éléments discrets. Les valeurs des paramètres utilisés dans les simulations présentés dans ce manuscrit sont indiquées dans le tableau 2.3. Sauf indication contraire, les simulations sont réalisées avec des paramètres correspondants au matériau IN718.

Paramètre		Valeur
ρ	Masse volumique (kg/m^3)	8000
d	Diamètre de particule (μm)	7 – 70
L	Longueur de plateau (mm)	10
V	Vitesse du racleur (mm/s)	50 – 250
e	Épaisseur (μm)	60

TABLE 2.3 – Paramètres procédé

La figure 2.16 montre le comportement de la poudre pendant l'étalement. Le racleur recueille la poudre sur la première plaque et une pile se forme devant lui, comme le montrent les résultats expérimentaux de Chen et al [75]. Lorsque le racleur atteint la zone de fabrication, la poudre se déverse sous celui-ci pour former la nouvelle couche.

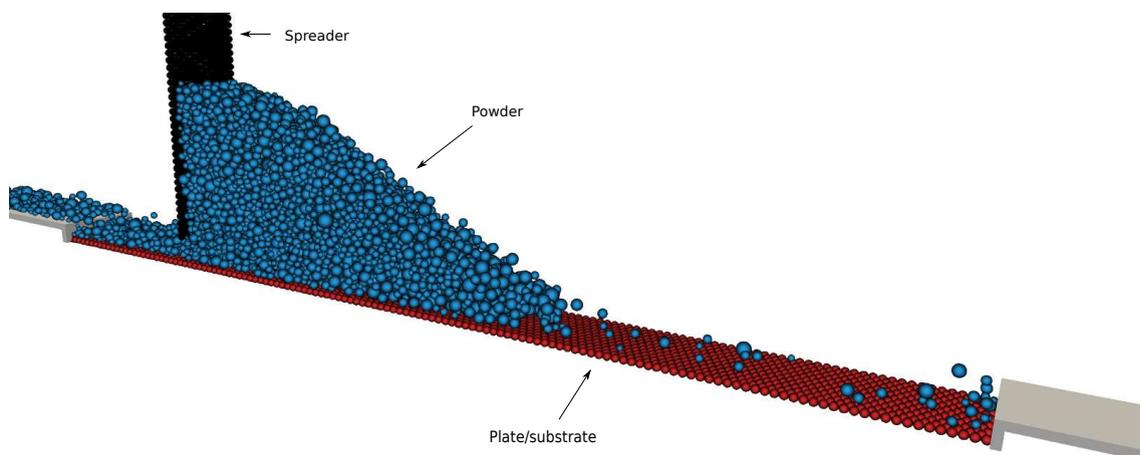


FIGURE 2.16 – Simulation 3D de l'étalement de poudre (vidéo)

2.6 Choix des paramètres numériques

2.6.1 Raideur

Le modèle utilisé pour gérer la répulsion lors d'un contact entre deux particules est un modèle linéaire simple. Il existe également le modèle du contact de Hertz [70] qui est utilisé dans d'autres études et qui a l'avantage de faire intervenir des paramètres matériaux tels que le module d'Young et le coefficient de Poisson (équation 2.11).

$$\vec{F}_H = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta^{\frac{3}{2}} \vec{n} \quad (2.11)$$

Cependant, la valeur élevée du module de Young rend la rigidité de contact très élevée. Le pas de temps critique dépend de la rigidité de contact et de la masse du grain selon la condition (2.12) (modèle spring-dashpot).

$$\Delta t \leq 0.15 \sqrt{\frac{M_{min}}{k}} \quad (2.12)$$

Cette condition à respecter est expliquée dans la partie concernant l'intégration numérique. La poudre de fabrication additive est constituée de grains dont le diamètre est de la taille de quelques microns. Pour des particules de cette taille, la masse est très faible. Il en résulte un pas de temps très faible. Pour obtenir un temps de calcul raisonnable, un pas de temps plus grand est nécessaire. Le coût de calcul élevé de la méthode des éléments discrets ne permet pas d'utiliser le modèle de Hertz dans ce cas à moins de modifier la valeur du module d'Young [67]. La rigidité de contact est alors modifiée car elle n'a pas d'impact sur le comportement granulaire global avec les valeurs testées [73, 67]. Néanmoins, certaines conditions doivent être respectées : l'interpénétration doit être limitée pour éviter les problèmes numériques. Cela se traduit par la relation $\frac{\delta}{R} < 1\%$ où δ est l'interpénétration entre les grains en contact et R leur rayon. La valeur de la raideur de contact doit permettre de respecter cette condition alors que certaines forces comme le poids ou l'adhésion peuvent agir de manière à augmenter l'interpénétration. Par exemple, dans le cas de l'adhésion il faut que la force de répulsion puisse compenser la force d'attraction : $k\delta \sim \gamma R$ soit $k > 100 \times \gamma$. Pour ces raisons, en lien avec les valeurs d'adhésion qui seront étudiées dans ce travail et sans indication contraire, la valeur de la raideur utilisée est de $k = 0.1 N/m$. En cas d'adhésion élevée, la valeur de k peut être ajustée pour respecter la condition précédente.

2.6.2 Coefficient de restitution

La valeur utilisée dans l'équation 2.4 est $e = 0.1$. Cette faible valeur permet de stabiliser la simulation sans générer d'effets visqueux non-physiques.

2.6.3 Coefficient de frottement

Selon les matériaux utilisés, le coefficient de frottement peut varier fortement. De plus lorsque les matériaux en contact sont de nature différente (exemple : métal/silicone), le coefficient de frottement est encore différent. Les valeurs de coefficient de frottement utilisés dans ce travail se situent dans une plage entre 0 et 0.9 dans laquelle les métaux considérés se situent. Une étude sera réalisée pour comprendre l'influence de ce paramètre sur le comportement de la poudre.

2.6.4 Énergie d'adhésion

L'adhésion est une interaction qui affecte grandement les propriétés d'écoulement des milieux granulaires. Cela peut s'illustrer parfaitement par la différence entre le sable sec et le sable mouillé par les ponts liquides formés entre les grains de sable. Une énergie d'adhésion élevée s'applique, ce qui tend à maintenir les grains collés entre eux. Dans le cas des poudres métalliques, il y a très peu d'humidité mais le poids des plus petits grains peut être assez faible pour que les forces de Van der Waals deviennent influentes. Une étude sur l'effet de l'adhésion sera réalisée pour comprendre à quel point ce paramètre affecte l'étalement. L'impact de l'énergie d'adhésion sera étudié pour des valeurs allant de 0 mJ/m^2 à 10 mJ/m^2 .

2.7 Conclusion

Le code de calcul développé et le modèle numérique mis en place permettent de simuler l'étalement de poudre dans le procédé LBM. Il est important de modéliser au mieux tous les éléments qui jouent un rôle majeur lors de ce procédé comme la poudre, les interactions entre les grains, le racleur, le plateau ou la pièce en fabrication. Il faut faire des choix importants pour allier la précision des résultats avec la rapidité du temps de calcul. Par exemple, il a été choisi de prendre en compte la rugosité de la surface en la modélisant par un nombre d'éléments discrets important tout en choisissant également de modéliser les grains par des sphères parfaites pour simplifier les calculs.

Chapitre 3

Méthodologie de caractérisation des paramètres matériaux

Résumé

Le modèle numérique élaboré dans le chapitre précédent fait intervenir des paramètres physiques qui dépendent du matériau utilisé et des conditions environnementales. Il s'agit du coefficient de frottements et du paramètre d'adhésion. Ces paramètres doivent être déterminés précisément afin d'obtenir une simulation de l'étalement représentative d'un étalement réel. Premièrement, une étude préliminaire montre que lorsque le coefficient de frottements varie, les propriétés du lit de poudre ne sont que très peu impactées. Au contraire, lorsque l'énergie d'adhésion varie, le lit de poudre final est très différent. Il est donc nécessaire d'identifier la valeur de l'énergie d'adhésion à intégrer dans la simulation numérique. Une étude des modèles analytiques de calcul de l'énergie d'adhésion montre qu'ils ne sont pas adaptés au modèle numérique utilisé. Il est donc nécessaire d'utiliser un moyen expérimental pour identifier ce paramètre. L'objectif est alors d'élaborer une méthodologie de caractérisation de l'énergie d'adhésion pour un échantillon de poudre donné. La stratégie employée pour réaliser cela consiste à comparer le comportement de la poudre dans des essais de caractérisation bien connus dans le milieu granulaire (tambour tournant, cône de Hall) entre l'essai expérimental et une simulation numérique équivalente. Les problématiques de coût de calcul de la méthode des éléments discrets et le nombre important de particules dans ces essais rendent la réalisation de simulation représentative de l'essai réel difficile. Finalement, l'essai expérimental choisi pour caractériser l'énergie d'adhésion de la poudre est celui qui consiste à mesurer l'angle de talus que forme celle-ci.

Sommaire

3.1 Études préliminaires de l'influence des paramètres ma- tériaux	83
3.1.1 Propriétés du lit de poudre	83
3.1.2 Coefficient de frottement	84
3.1.3 Énergie d'adhésion	85
3.2 Modèle analytique d'adhésion	87
3.2.1 Force de Van der Waals et modèle aqueux	87
3.2.2 Modèle avec aspérités	89
3.3 Analyse des essais de caractérisation existants	91
3.3.1 Tambour tournant	91
3.3.1.1 Essai expérimental	91
3.3.1.2 Modèle numérique	93
3.3.1.3 Conclusion	95
3.3.2 Essai de coulabilité	95
3.3.2.1 Cône de Hall/Carney expérimental	96
3.3.2.2 Modèle numérique	97
3.3.2.3 Conclusion	98
3.3.3 Angle de talus	98
3.4 Choix de l'essai de caractérisation	100
3.4.1 Modélisation numérique	101
3.4.2 Conditions axi-périodiques rectilignes	107
3.4.3 Conclusion	112
3.5 Conclusion	112

3.1 Études préliminaires de l'influence des paramètres matériaux

Le coefficient de frottement et l'énergie d'adhésion du modèle de comportement granulaire utilisé dans ce travail sont des paramètres qui ne peuvent pas être connus a priori. Il serait trop complexe de mettre en place un système capable de mesurer de tels coefficients entre deux grains si petits. De plus, la morphologie et la taille des grains différentes dans chaque cas rend ce problème encore plus complexe. Il est donc important d'essayer d'identifier les valeurs de ces coefficients pour le comportement d'un ensemble de grains. Une première étude sur l'influence des paramètres matériaux sur le lit de poudre final permettra de savoir sur quels paramètres doit se concentrer ce travail.

3.1.1 Propriétés du lit de poudre

Afin de comparer le lit de poudre final pour différentes configurations de paramètres, il est important de définir les propriétés qui permettront d'analyser sa qualité. Les propriétés mesurées choisies sont la densité, le nombre de coordination et la répartition spatiale de la taille moyenne des grains puisque le lit de poudre doit être dense et homogène pour une bonne fusion laser. La mesure de la taille des grains en fonction de la position dans le lit de poudre doit permettre d'observer l'homogénéité et éventuellement de mettre en évidence la ségrégation des particules au cours de l'étalement. Les pièces produites par le procédé LBM peuvent présenter un niveau élevé de porosité si le lit de poudre n'est pas assez dense. La densité doit alors être aussi élevée que possible pour minimiser les porosités et permettre une meilleure efficacité de la fusion par le laser. L'étude de la taille moyenne des grains peut être intéressante en fonction de la position dans le lit de poudre pour vérifier le phénomène de ségrégation. Ce phénomène a déjà été observé dans d'autres domaines tels que les mélangeurs par exemple [101]. Dans le procédé d'étalement, l'écoulement de la poudre pourrait avoir pour conséquence que les petites particules se trouvent plutôt au début de la zone du lit de poudre alors que les plus grosses particules se trouvent à la fin. Enfin, le nombre de coordination est le nombre moyen de contacts par grain. Ce paramètre est fortement lié à la conductivité thermique du lit de poudre, car la conduction thermique est meilleure à travers la matière solide lorsque les grains sont en contact qu'à travers le gaz. Il est donc important d'obtenir un nombre de coordination élevé et homogène. Une zone de post-traitement est définie et identifiée par la zone bleue sur la figure 2.15 dans le lit de poudre. Cette

zone est subdivisée (Figure 3.1) pour calculer les propriétés dans chaque cellule et les comparer à travers la position dans le lit de poudre. La densité est calculée par le rapport entre le volume de chaque grain appartenant à une cellule et le volume de la cellule.

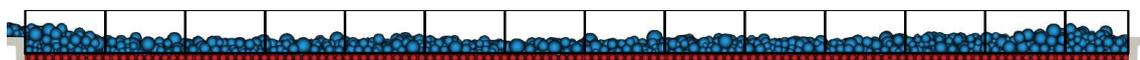


FIGURE 3.1 – Subdivision de la zone du lit de poudre

3.1.2 Coefficient de frottement

Il est nécessaire de comprendre l'influence du coefficient de frottement sur l'étalement du lit de poudre pour évaluer la précision nécessaire à la caractérisation de ce coefficient. Même si pour un matériau donné, le coefficient de frottement est un paramètre propre au matériau, cette étude permet de comprendre le comportement des poudres dont le coefficient de frottement est plus ou moins élevé. Comme le montre la figure 3.2, le lit de poudre semble avoir globalement les mêmes propriétés pour les valeurs des paramètres étudiés ($\mu = 0$, $\mu = 0.01$, $\mu = 0.1$, $\mu = 0.3$, $\mu = 0.9$, large gamme de coefficient de frottement des métaux) et aucune tendance ne se dégage¹. Selon ces résultats, le coefficient de frottement n'a pas d'impact conséquent sur le procédé d'étalement, il sera donc supposé constant par la suite. Cela confirme le résultat obtenu par Meier et al [73] où le coefficient de frottements n'a pas d'effet sur le résultat de simulation d'angle de talus.

1. Dans cette étude, il n'y a pas d'adhésion au sein de la poudre. L'erreur sur le modèle de frottements évoquée dans le chapitre 2 n'a donc pas d'influence sur le résultat montré ici.

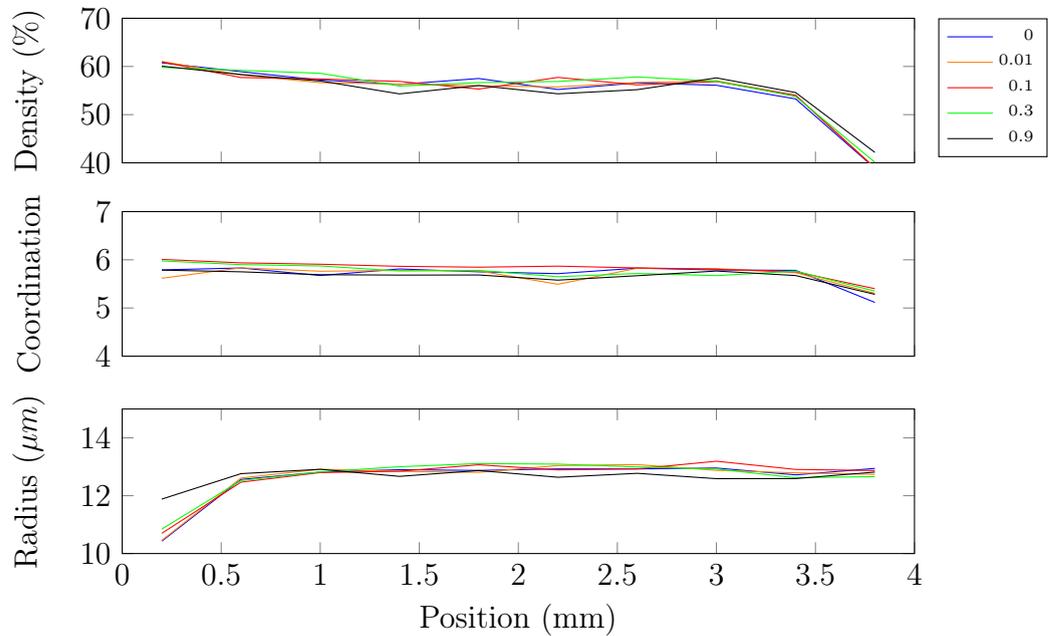


FIGURE 3.2 – Coefficient de frottements

3.1.3 Énergie d'adhésion

Comme pour le frottement, l'adhésion dépend du matériau de l'échantillon de poudre étudié mais aussi de l'environnement et des conditions de stockage comme par exemple pour le niveau d'humidité. Il est nécessaire de comprendre la différence de comportement entre une poudre non adhésive et une poudre plus ou moins adhésive. Des simulations ont été réalisées avec différentes énergies d'adhésion ($\gamma = 10 \text{ mJ/m}^2$, $\gamma = 5 \text{ mJ/m}^2$, $\gamma = 1 \text{ mJ/m}^2$, $\gamma = 0,5 \text{ mJ/m}^2$, $\gamma = 0.1 \text{ mJ/m}^2$, $\gamma = 0 \text{ mJ/m}^2$, la valeur d'adhésion maximale est choisie après des tests numériques d'écoulement qui ont montré que l'écoulement de la poudre était très détérioré avec $\gamma = 10 \text{ mJ/m}^2$). La figure 3.3 montre que l'adhésion a un impact important sur le lit de poudre final. La densité et le nombre de coordination évoluent dans des directions opposées. Pour une poudre très adhésive, il y a des amas de particules où la densité est localement très élevée (indice de coordination élevé) mais aussi des cavités qui détériorent la densité moyenne du lit de poudre comme le montrent les figures 3.3 et 3.4. Ces résultats sont confirmés par diverses études [58, 75] numériquement et expérimentalement où il est montré notamment que l'utilisation de petites particules, qui sont les plus impactées par l'effet de l'adhésion, produisent des lits de poudres de moins bonne qualité avec des manques de poudre.

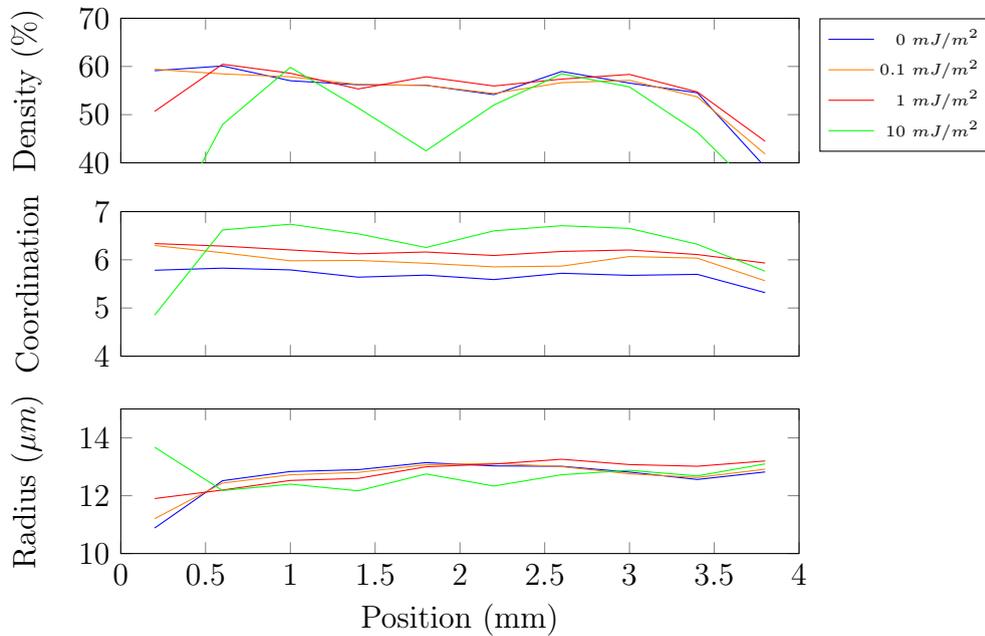


FIGURE 3.3 – Énergie d'adhésion

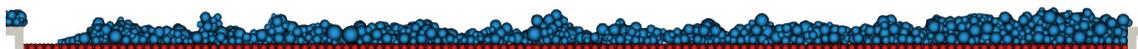
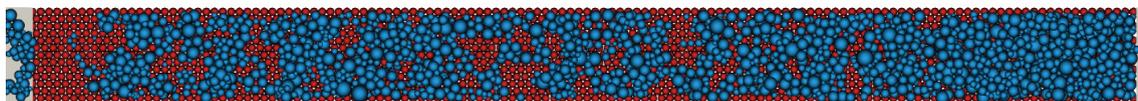
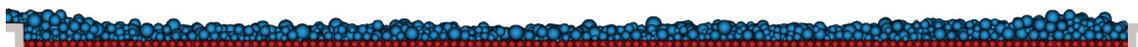
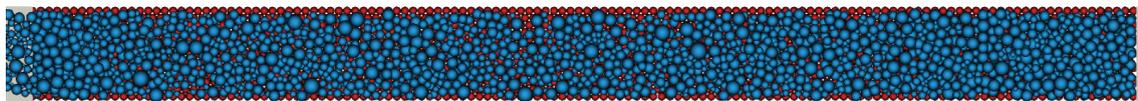


FIGURE 3.4 – Effet de l'adhésion (vidéo)

Au contraire, le lit de poudre obtenu avec une poudre non adhésive est plutôt dense mais avec un faible nombre de coordination par rapport aux autres essais. Les simulations réalisées avec $\gamma = 1 \text{ mJ/m}^2$ et $\gamma = 0.5 \text{ mJ/m}^2$ fournissent une densité similaire à celles fournies avec $\gamma = 0 \text{ mJ/m}^2$ avec un nombre de coordination bien plus élevé. Cela montre que l'adhésion de la poudre ne doit pas être trop élevée au risque de produire un mauvais lit de poudre mais une valeur faible non nulle permet

d'améliorer le nombre de contacts entre les grains. Plus il y a de contacts entre les grains, plus la diffusion de chaleur sera homogène.

Contrairement au coefficient de frottement, l'énergie d'adhésion a un effet significatif sur les propriétés finales du lit de poudre. Ce paramètre devra être identifié avec précision afin de réaliser les simulations d'étalement de lit de poudre. Dans un premier temps, il est proposé dans la suite du document d'explorer les modèles analytiques reliant un effort d'adhésion entre deux particules et leurs propriétés afin d'insérer cette relation de comportement dans la simulation numérique.

3.2 Modèle analytique d'adhésion

Il existe quelques modèles analytiques dont le but est de modéliser l'effet de l'adhésion entre les particules.

3.2.1 Force de Van der Waals et modèle aqueux

Le premier est celui qui décrit les forces de Van der Waals : $\overrightarrow{F_{VdW}} = \frac{\hbar\bar{w}}{8\pi H^2} R\vec{n}$ où $\hbar\bar{w} = 1.86 \times 10^{-19} N.m$ (alumine), H est la distance entre les particules qui est fixée à 4 car en pratique la force est appliquée seulement lorsque les particules sont en contact [102]. Pour modéliser l'adhésion liée à la présence d'humidité dans la poudre et impliquée par la formation de capillaires aqueux, le modèle suivant peut être utilisé : $\overrightarrow{F_{aqu}} = 2\pi\gamma R\vec{n}$, où $\gamma = 72.75 \times 10^{-3} N/m$ [103].

Afin de comparer les modèles d'adhésions, des simulations sont réalisées sur un petit cône de Hall (Figure 3.5), dispositif en forme d'entonnoir, où l'écoulement se bloque lorsque l'adhésion au sein de la poudre est assez importante.

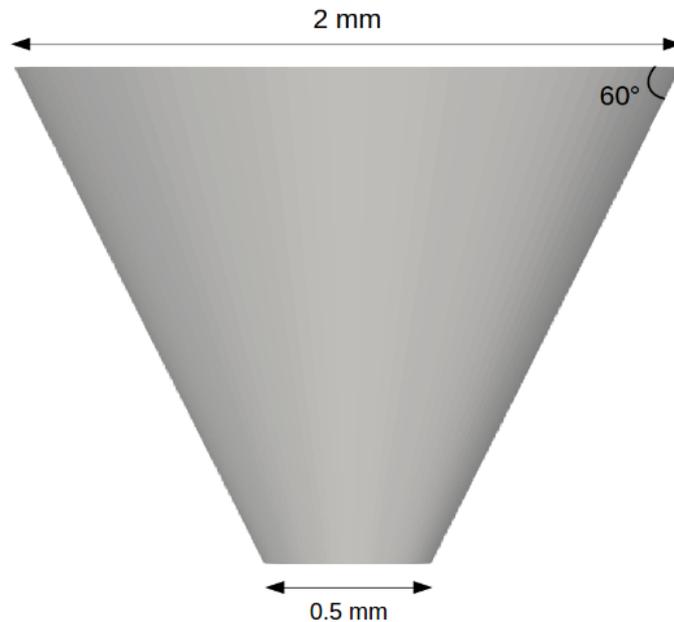


FIGURE 3.5 – Cône de Hall utilisé pour comparer les modèles d'adhésion

0 Les figures 3.6 et 3.7 montrent que ce modèle, même sans capillaires aqueux, génère une adhésion bien trop élevée par rapport à la taille des grains. En effet, le cas avec un échantillon dont la taille moyenne de particule est de $50 \mu m$ ne coule pas alors qu'en réalité, le poids de ces particules est nettement supérieur à la force d'adhésion (voir les résultats expérimentaux dans la partie 3.3.2 consacrée au cône de Hall).

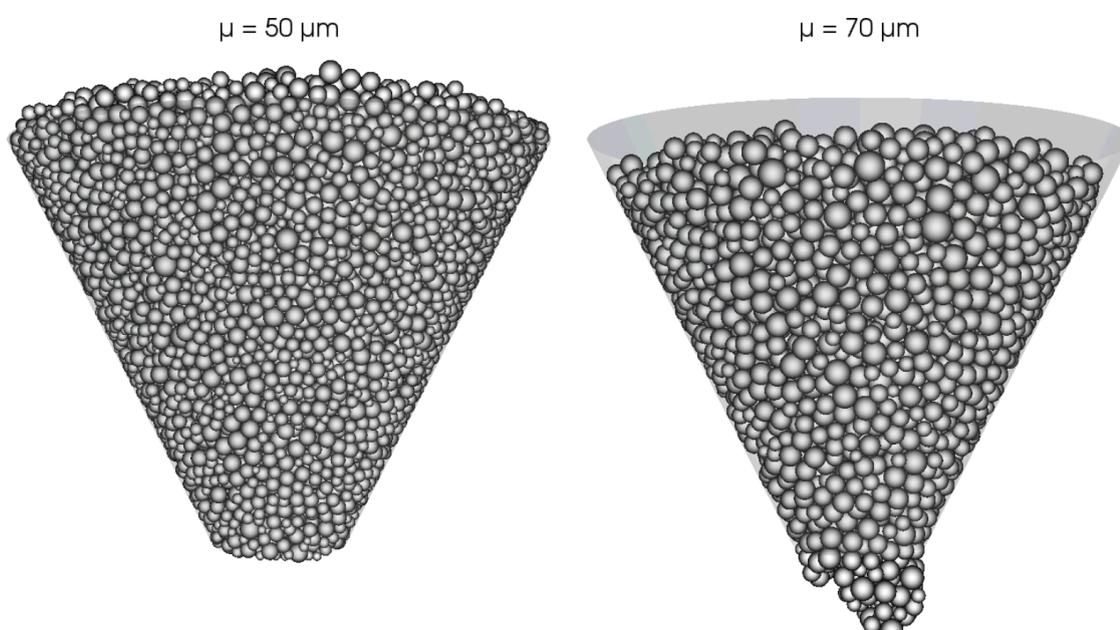
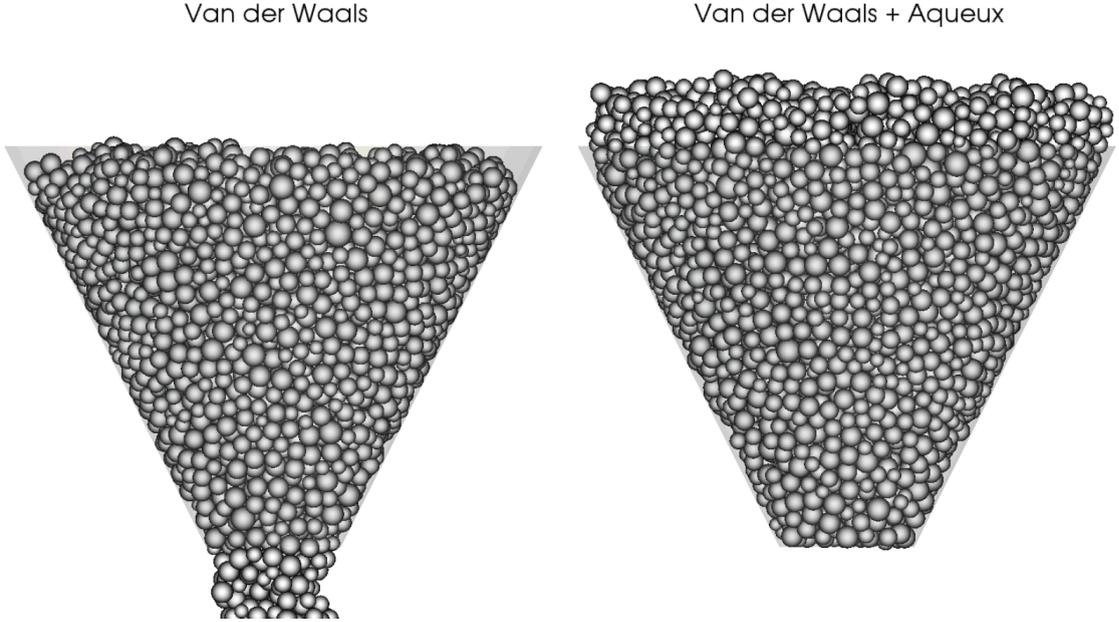


FIGURE 3.6 – Forces de Van der Waals pour $\mu = 50 \mu m$ et $70 \mu m$ (vidéo)


 FIGURE 3.7 – Avec/sans modèle aqueux $\mu = 70 \mu m$ (vidéo)

3.2.2 Modèle avec aspérités

Puisque le modèle précédent implique une adhésion trop élevée, l'hypothèse des particules parfaitement sphériques simplifie peut-être trop le problème. En réalité, les particules présentent des aspérités à leur surface. Le modèle suivant prend en compte des aspérités à la surface des particules, ce qui modifie l'expression de la force de Van der Waals [102].

Van der Waals :

$$F_{VdW} = \frac{\hbar\bar{w}}{8\pi(H+2R_{asp})^2} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{\hbar\bar{w}}{8\pi H^2} \frac{R_{asp} R_{asp}}{R_{asp} + R_{asp}} + \frac{\hbar\bar{w}}{8\pi(H+R_{asp})^2} \frac{R_1 R_{asp}}{R_1 + R_{asp}} + \frac{\hbar\bar{w}}{8\pi(H+R_{asp})^2} \frac{R_2 R_{asp}}{R_2 + R_{asp}}$$

Par exemple, pour des particules dont les rayons sont $R_1 = R_2 = 15 \mu m$, et un rayon d'aspérités de $R_{asp} = 5 nm$, la longue expression de cette force peut-être simplifiée en faisant disparaître une partie négligeable comme le montre l'équation 3.1.

$$F_{VdW} = \frac{\overbrace{\frac{\hbar\bar{w}}{8\pi(H+2R_{asp})^2} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}^{5,13 \cdot 10^{-10} N}} + \frac{\overbrace{\frac{\hbar\bar{w}}{8\pi H^2} \frac{R_{asp}}{2}}^{1,16 \cdot 10^{-10} N}} + \frac{\overbrace{\frac{\hbar\bar{w}}{8\pi(H+R_{asp})^2} \frac{R_1 R_{asp}}{R_1 + R_{asp}}}}{1,27 \cdot 10^{-12} N} + \frac{\overbrace{\frac{\hbar\bar{w}}{8\pi(H+R_{asp})^2} \frac{R_2 R_{asp}}{R_2 + R_{asp}}}}{1,27 \cdot 10^{-12} N} \quad (3.1)$$

L'expression de la force de Van der Waals en tenant compte des aspérités s'exprime alors $\vec{F}_{VdW} = \left(\frac{\hbar\bar{w}}{8\pi(H+2R_{asp})^2} \frac{R_1 R_2}{R_1+R_2} + \frac{\hbar\bar{w}}{8\pi H^2} \frac{R_{asp}}{2} \right) \vec{n}$

Le modèle de capillaires aqueux considère alors des ponts liquides entre les aspérités : $\vec{F}_{aqu} = 2\pi\gamma \frac{R_{asp}}{2} \vec{n}$

La figure 3.8 montre le modèle d'adhésion avec aspérités (avec modèle aqueux) appliqués à différents échantillons de poudre réels (10-45 μm , 45-63 μm , 63-75 μm , 90-100 μm). Dans ce cas l'adhésion n'est pas assez élevée puisque le premier échantillon (10-45 μm) au moins ne devrait pas avoir la capacité de couler (conformément aux résultats expérimentaux développés dans la partie sur le cône de Hall) alors que le cône utilisé dans la simulation a un orifice plus petit que dans le cas expérimental, ce qui devrait d'autant plus empêcher la poudre de couler. Même l'augmentation du R_{asp} à 100 nm, qui est une valeur très importante par rapport à la taille réelle des aspérités, ne suffit pas à obtenir assez d'adhésion.

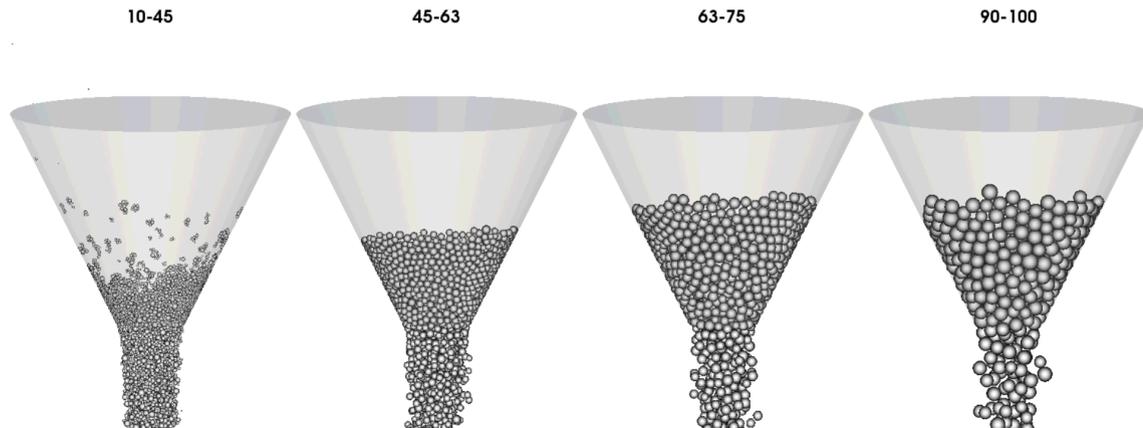


FIGURE 3.8 – Échantillons réels ($R_{asp} = 5 \text{ nm}$) (vidéo)

Finalement, les deux modèles présentés ici ne permettent pas d'obtenir un comportement réaliste. Le premier cas génère trop d'adhésion, le cas avec aspérités n'en génère pas assez (inégalité de l'équation 3.2). Il faut alors se référer à des essais de caractérisation pour identifier l'effet de l'adhésion et pouvoir le discriminer. La réalisation d'essais pour identifier la force d'adhésion entre deux particules est trop complexe à réaliser des faibles intensités et de la faible taille de grain. Ce sont alors des essais de caractérisation du comportement global de la poudre qui peuvent être utilisés. En revanche, cela ne permet pas d'obtenir directement le modèle correspondant (relation force/déplacement). L'objectif est donc de développer une simulation numérique équivalente de l'essai de caractérisation et comparer le comportement de la poudre dans le cas expérimental et le cas numérique. Le modèle initial présenté dans le chapitre 2 : $\vec{F}_a = \gamma R^* \vec{n}$ est celui qui est utilisé dans la suite de ce travail

avec l'énergie d'adhésion γ qui est un coefficient à caractériser.

$$\underbrace{\frac{\hbar\bar{w}}{8\pi H^2} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}_{\text{Van der Waals}} > \overbrace{\gamma \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}^{\text{Modèle utilisé}} > \underbrace{\frac{\hbar\bar{w}}{8\pi (H + 2R_{asp})^2} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{\hbar\bar{w}}{8\pi H^2} \frac{R_{asp}}{2}}_{\text{Modèle analytique avec aspérités}} \quad (3.2)$$

3.3 Analyse des essais de caractérisation existants

Les paramètres matériaux ayant une influence importante sur le comportement de la poudre, il est important d'identifier leur valeur. Les particules étant extrêmement petites, il est difficile de réaliser une expérience pour mesurer précisément un coefficient de frottements ou une énergie d'adhésion entre deux particules individuelles. Pour cette raison, il est préférable d'observer le comportement global d'une poudre et de le comparer à une simulation équivalente du comportement de la poudre pour identifier les valeurs de paramètres matériaux qui font correspondre le comportement observé et celui simulé. Pour cela, un équivalent numérique de l'essai expérimental choisi doit être développé.

3.3.1 Tambour tournant

Le premier essai envisagé pour caractériser les paramètres matériaux est le tambour tournant aussi appelé tambour rotatif. Il s'agit d'un cylindre à moitié rempli de poudre qui tourne à une vitesse donnée. Cette rotation implique un mouvement de la poudre qui s'écoule au sein du tambour et le profil de la surface libre de la poudre forme un certain angle appelé angle de repos dynamique. Selon la nature de la poudre (matériau, forme des grains) et les conditions environnementales (humidité), l'écoulement peut être plus ou moins difficile et présenter un angle plus ou moins important. Plus l'angle est faible, meilleure est la coulabilité.

3.3.1.1 Essai expérimental

Le dispositif expérimental choisi est un cylindre d'environ 8 cm de diamètre et 5 cm de large. La vitesse de rotation peut varier entre 1 et 70 RPM (tours par minute), soit 4 mm/s à 290 mm/s à la surface du cylindre ce qui permet d'atteindre les mêmes vitesses que le racleur lors de l'étalement. Les côtés du cylindre sont transparents pour permettre l'observation de l'évolution du profil de la poudre par une caméra.

L'avantage de cet essai est qu'il y a la possibilité de mesurer un indice de cohésion qui ne dépend que de l'adhésion entre les particules [37]. Cet indice de cohésion est mesuré en comparant le profil de la poudre au cours du temps. En effet, puisque plusieurs images sont prises au cours de l'essai, le profil de la poudre n'est pas exactement le même. Cet indice est calculé en mesurant les variations de profil entre chaque image et le profil moyen. Le profil moyen de la poudre est calculé en fonction des différentes images capturées au cours du temps. Si chaque image donne un profil proche de la moyenne alors le profil ne varie pas beaucoup et la poudre est peu cohésive. En revanche si le profil varie beaucoup c'est caractéristique d'une poudre très cohésive. Cependant il reste difficile de relier cet indice de cohésion à l'énergie d'adhésion utilisée dans le modèle numérique. L'autre paramètre que permet de mesurer cet essai est l'angle d'avalanche de la poudre. C'est-à-dire l'angle maximal que la poudre parvient à former par rapport à l'horizontale avant de s'effondrer. Lorsque la vitesse de rotation devient élevée, la surface libre de la poudre laisse apparaître une forme de S (Figure 3.9a). La mesure de l'angle d'avalanche est réalisé sur la pente au centre du cylindre pour éviter les effets de bord.

Le profil en S est composé de trois pentes principales (Figure 3.9b), une méthode de mesure par analyse d'image a été développée pour mesurer les trois pentes et permettre la comparaison avec la simulation.

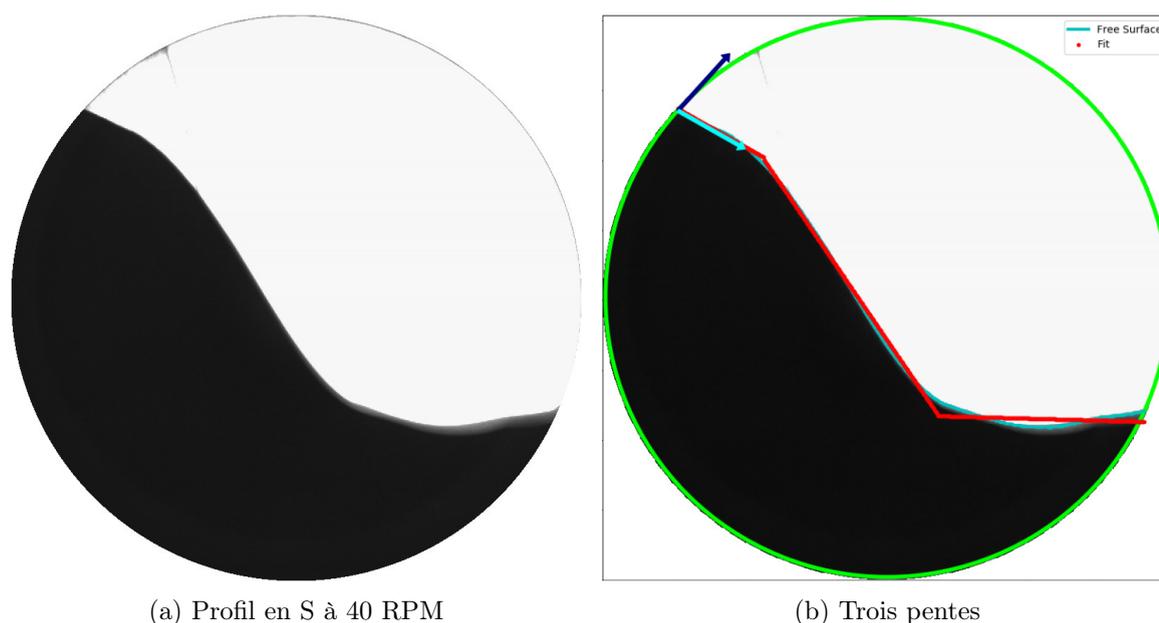


FIGURE 3.9 – Tambour tournant expérimental

La figure 3.10 montre l'évolution de chacune de ces pentes en fonction de la

vitesse de rotation. Les courbes pleines sont la moyenne de chacun des angles sur la totalité des images de l'essai, l'aire en transparence correspond aux angles minimum et maximum mesurés pour chaque essai. L'angle 1 correspond au point le plus haut où la poudre s'écroule, l'angle 2 correspond à l'angle d'avalanche et le dernier angle est la pente de la réserve de poudre là où la poudre qui tombe vient se loger. Les résultats montrent que l'angle d'avalanche augmente avec la vitesse de rotation comme attendu. On observe également que l'angle 1 se stabilise autour de 35-40 ° et que la pente de la réserve de poudre devient horizontale. L'objectif est d'obtenir le même type de résultat avec la simulation.

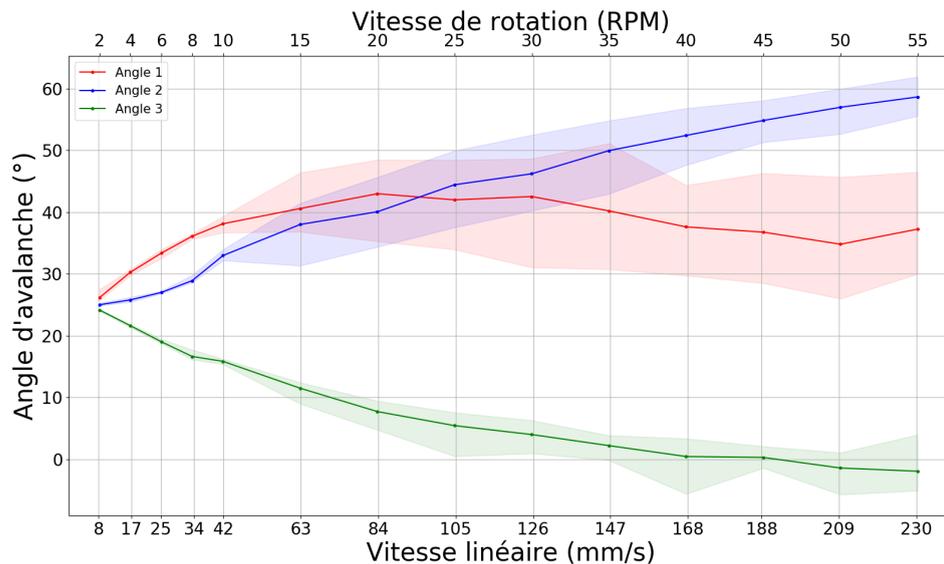


FIGURE 3.10 – Évolution des angles en fonction de la vitesse de rotation

3.3.1.2 Modèle numérique

La quantité de poudre utilisée dans l'essai expérimental ne permet pas de réaliser la simulation de cet essai avec la même géométrie. En effet, en considérant un cylindre de 10 cm de diamètre et de 5 cm de large rempli à moitié : cela correspond à environ 10 milliard de grains. Afin de réduire la quantité de poudre simulée, il est d'abord décidé d'utiliser des conditions périodiques dans la largeur comme pour la simulation de l'étalement de la poudre. Avec une largeur de $300 \mu m$, le nombre de grains passe à environ 50 millions. Cela représente encore un nombre d'éléments trop important. Une réduction de la géométrie du cylindre est alors nécessaire.

Pour pouvoir comparer les deux cas, il faut que la vitesse linéaire en périphérie soit identique. Soit R_{exp} le rayon du tambour tournant et ω_{exp} sa vitesse de rotation, respectivement R_{num} et ω_{num} leur équivalent pour la simulation numérique. Il faut

alors respecter la condition suivante : $R_{exp}\omega_{exp} = R_{num}\omega_{num}$

Par exemple, en considérant $R_{exp} = 5\text{ cm}$, $\omega_{exp} = 60\text{ RPM} = 6\text{ s}^{-1}$ et la simulation avec un cylindre de $R_{num} = 5\text{ mm}$. La vitesse du cylindre doit être $\omega_{num} = \omega_{exp} \frac{R_{exp}}{R_{num}} = 60\text{ s}^{-1}$.

Cependant, comme le montre la figure 3.11, à des vitesses élevées la force centrifuge est trop importante par rapport au poids des particules ce qui génère ce comportement très éloigné du comportement réel.

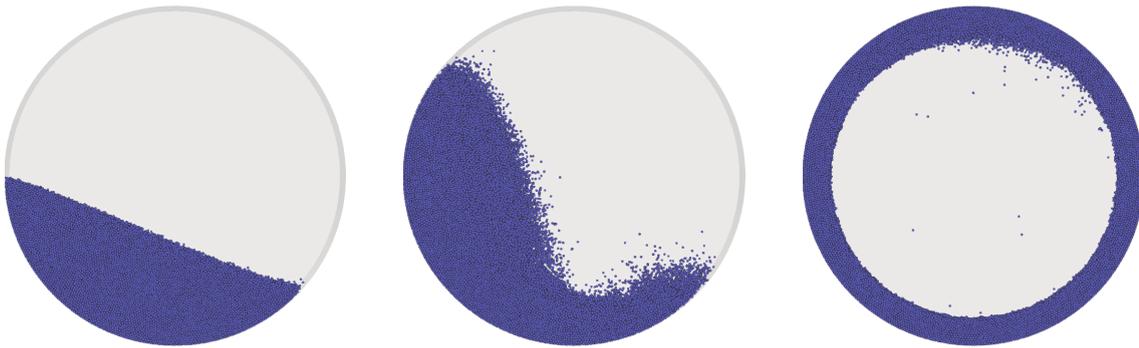


FIGURE 3.11 – Vitesses à la paroi : 8 mm/s, 105 mm/s, 230 mm/s (vidéo)

Il faut en effet, à la manière d'une similitude en mécanique des fluides, utiliser des nombres adimensionnés afin de respecter les rapports entre les différentes forces qui interviennent. Afin que le rapport entre la force centrifuge et le poids soit équivalent dans les deux cas il faut respecter la condition suivante : $\frac{R_{exp}\omega_{exp}^2}{g_{exp}} = \frac{R_{num}\omega_{num}^2}{g_{num}}$ avec g_{exp} et g_{num} l'accélération de la pesanteur respectivement dans le cas réel et le cas numérique. En effet, la taille du cylindre de la simulation étant fixée par les contraintes de coût de calcul et la vitesse de rotation par la vitesse à la paroi, l'intensité de la pesanteur doit être modifiée pour respecter le rapport entre la force centrifuge et le poids des particules. On a alors : $g_{num} = \frac{R_{num}\omega_{num}^2}{R_{exp}\omega_{exp}^2}g_{exp} = 98.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

En plus du poids, l'application du principe fondamental de la dynamique fait également intervenir les différentes forces liées aux interactions entre les grains. Soit \vec{F}_c les forces de contact, le Principe Fondamental de la Dynamique donne $m\vec{a} = \vec{F}_c + m\vec{g}$. Le rapport $\frac{F_c}{mg}$ doit également être équivalent. Cela demanderait de modifier la masse des particules. Or, dans l'optique de caractériser le comportement de la poudre, la modification de la masse des particules rend la comparaison difficile entre l'essai expérimental et la simulation.

Il serait alors plus intéressant d'adapter l'essai expérimental à la simulation plutôt que l'inverse. C'est-à-dire réduire la géométrie du cylindre de l'essai expérimental. Cependant, il s'avère que la présence des parois latérales est la principale cause du

profil en S que forme la poudre lorsque le cylindre a une vitesse de rotation élevée [104]. En effet, le frottement entre la paroi et les grains génère ce profil particulier alors qu'au centre du cylindre, lorsqu'il est assez grand, la surface libre de la poudre a un profil plat. Or il n'est pas possible de mesurer l'angle du profil de la poudre au centre du cylindre dans l'essai expérimental puisque la caméra ne peut qu'afficher le profil de poudre au niveau de la paroi. L'utilisation de conditions périodiques est alors à proscrire. De plus, la simulation de cet essai avec parois reviendrait à caractériser les interactions entre les grains et les parois plutôt que les interactions entre les grains seulement.

3.3.1.3 Conclusion

L'essai du tambour tournant peut être intéressant pour caractériser la coulabilité expérimentale de la poudre grâce à l'angle de repos dynamique et l'indice de cohésion. En revanche il ne peut pas être utilisée pour identifier les paramètres matériaux de la poudre pour le modèle numérique. Il faut alors se tourner vers un autre essai.

3.3.2 Essai de coulabilité

Le second essai envisagé est le test de coulabilité de la poudre par un cône de Hall ou Cône de Carney. Il s'agit d'une sorte d'entonnoir de forme conique avec un orifice vers le bas pour laisser la poudre s'écouler. La taille de l'orifice est de 2.5 mm pour le cône de Hall [21, 22] et de 5 mm pour le cône de Carney [23]. Cet essai consiste à mesurer le temps que met l'échantillon de poudre testé à s'écouler à travers le cône. Dans le cas où la coulabilité d'une poudre n'est pas bonne, il se peut qu'elle ne coule pas à travers le cône de Hall. L'utilisation du cône de Carney s'avère alors nécessaire.

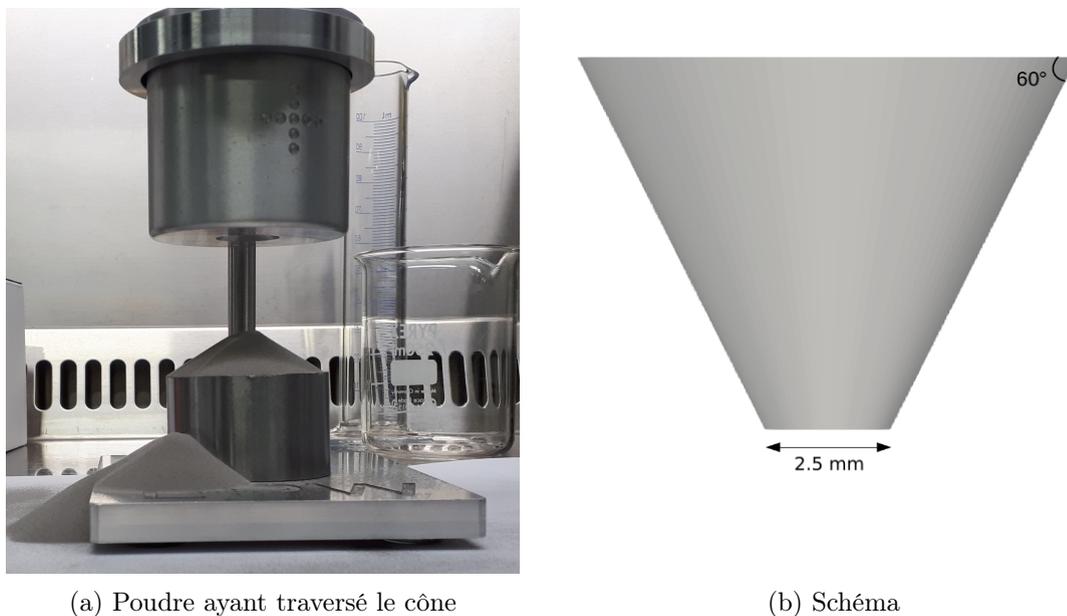


FIGURE 3.12 – Cône de Hall

3.3.2.1 Cône de Hall/Carney expérimental

Des essais ont été réalisés pour comparer l'essai du cône de Hall avec la simulation numérique équivalente. Plusieurs lots de poudre avec des granulométries différentes ont été testées à travers le cône de Hall. Lorsque la poudre n'arrive pas à couler à travers le cône de Hall, elle est également testée à travers le cône de Carney (diamètre deux fois plus grand : 5mm) et est étuvée pour être testée à nouveau dans le cône de Hall. L'objectif étant de mettre en valeur le fait que l'adhésion joue un rôle sur la coulabilité de la poudre, en particulier sur les plus petites particules.

Le tableau 3.1 répertorie les résultats des essais réalisés chez Safran. Chaque lot de poudre est répertorié par ses déciles d_{10} et d_{90} . Pour chaque cas, le tableau indique si la poudre coule ou non à travers le cône. Le temps d'écoulement était également mesuré mais les résultats obtenus montraient un temps similaire dans chaque cas ce qui ne permet pas d'apporter d'information supplémentaire.

Lot de poudre		Écoulement			
∅ d10	∅ d90	Hall	Carney	Hall étuvé	Carney étuvé
10	53	non	non	non	oui
10	45	non	non	non	non
45	53	oui	oui	oui	—
53	106	oui	—	—	—
53	63	oui	—	—	—
53	75	oui	—	—	—
63	75	oui	—	oui	—
75	90	oui	—	—	—
63	90	oui	—	—	—
75	100	oui	—	—	—
90	100	oui	—	oui	—

TABLE 3.1 – Essais de coulabilité réalisés par Rémi Giraud

Ces essais montrent que lorsque la poudre est étuvée, c'est-à-dire lorsque le taux d'humidité de la poudre est réduit, le lot de poudre 10-53 coule à travers le cône de Carney. Cependant malgré l'étuvage, l'adhésion au sein du lot de poudre est trop importante pour couler à travers le cône de Hall. Concernant le lot 10-45 qui contient principalement des petites particules par rapport aux autres échantillons testés, la poudre ne coule dans aucun des cas. Les autres échantillons, composés de plus gros grains, coulent à travers le cône de Hall sans étuvage. Le taux d'humidité des poudres utilisées pour la fabrication additive est très faible, cela explique pourquoi la poudre peut couler à travers le cône de Hall dans la plupart des cas et également pourquoi l'étuvage n'a pas permis d'améliorer l'écoulement pour le lot de poudre la plus fine.

3.3.2.2 Modèle numérique

La figure 3.13 montre une simulation d'écoulement de poudre à travers le cône de Hall avec différentes valeurs d'adhésion. L'influence de l'adhésion a un impact important sur la coulabilité de la poudre puisque plus l'adhésion est élevée plus la poudre a de difficultés à passer à travers l'orifice.

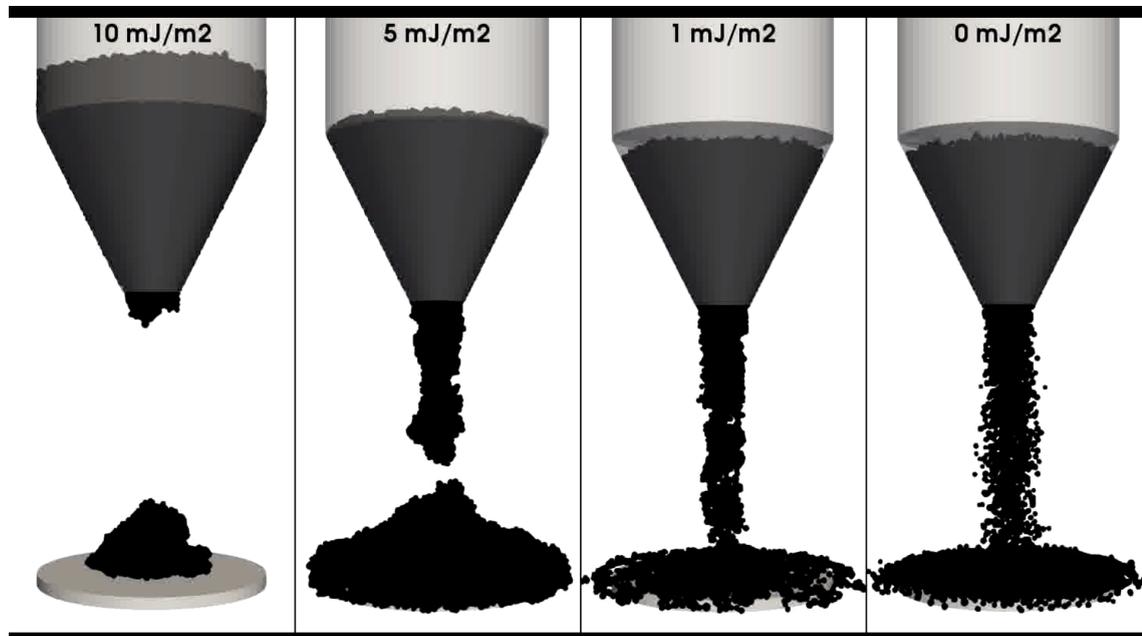


FIGURE 3.13 – Simulation de l'écoulement de poudre à travers le cône de Hall pour différentes valeurs d'adhésion (vidéo)

3.3.2.3 Conclusion

Comme pour le tambour tournant, l'inconvénient majeur de cet essai est la différence de géométrie entre la simulation et l'expérience. Le diamètre de l'orifice étant un paramètre important, il est difficile de comparer la simulation et l'expérience pour un échantillon de poudre donné. De plus, les essais expérimentaux de coulabilité à travers les cône de Hall et cône de Carney n'apportent pas beaucoup d'informations sur la coulabilité d'une poudre puisque lorsque la poudre coule, les temps d'écoulement sont relativement équivalents. La seule information pouvant être retenue à l'issue d'un essai est donc si la poudre coule ou non. Finalement, l'essai de coulabilité à travers le cône de Hall ne permet pas de réaliser une méthodologie d'identification de l'adhésion de la poudre.

3.3.3 Angle de talus

Le troisième essai envisagé est celui de l'angle de talus. A première vue cet essai ne semblait pas le plus intéressant puisque le comportement de la poudre est assez éloigné de l'étalement de la poudre. Cependant, dans l'optique d'identifier l'adhésion de la poudre, il semble finalement le mieux adapté pour cela. En effet, il n'y a pas de parois comme dans les deux essais précédents qui pourraient avoir un impact sur le résultat final. Ici la poudre s'écoule sur de la poudre donc seules les interactions

grain/grain sont à identifier. L'étude de Meier et al [73] montre que l'adhésion de la poudre joue un rôle majeur sur l'angle de talus et qu'il est possible de caractériser l'adhésion d'un échantillon de poudre en comparant l'essai expérimental de l'angle de talus à la simulation équivalente (Figure 3.14).

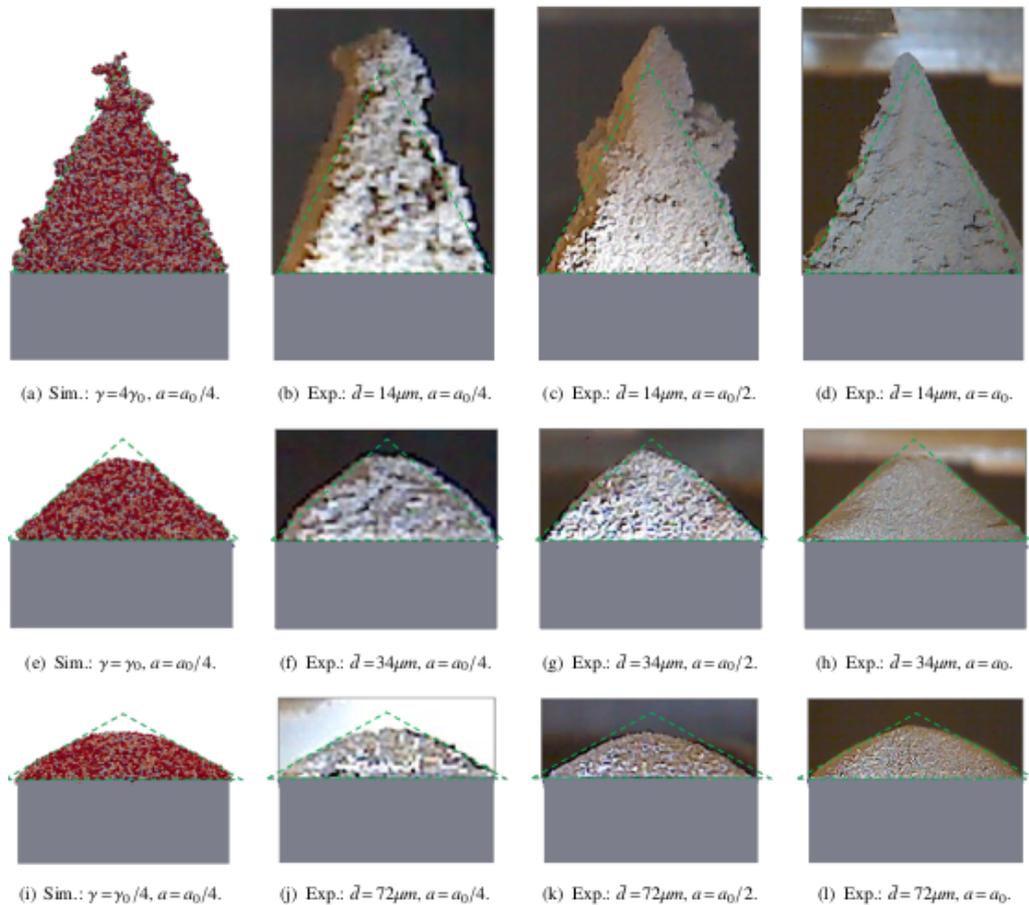


FIGURE 3.14 – Comparaison simulation/essai expérimental de l'angle de talus [73]

Une simulation de l'angle de talus a ainsi été développée pour mettre en place cet essai dans le protocole d'identification de la valeur d'adhésion. Le modèle numérique choisi consiste à remplir un tube de poudre puis d'élever le tube pour laisser s'écouler la poudre et former un tas. Lorsque les grains tombent du plateau, ils ne sont plus nécessaires à la simulation et sont supprimés pour réduire le coût de simulation. La figure 3.15 montre le résultat obtenu avec différentes valeurs d'adhésion pour un échantillon de poudre dont la granulométrie suit une loi de distribution normale de moyenne $\mu = 30 \mu m$, bornée avec une taille minimale de $20 \mu m$ et une taille maximale de $40 \mu m$. Puisque les grains utilisés sont gros, il faut que la valeur d'adhésion soit élevée pour faire apparaître son effet. La figure 3.16 montre bien l'augmentation de l'angle de talus avec l'adhésion de la poudre.

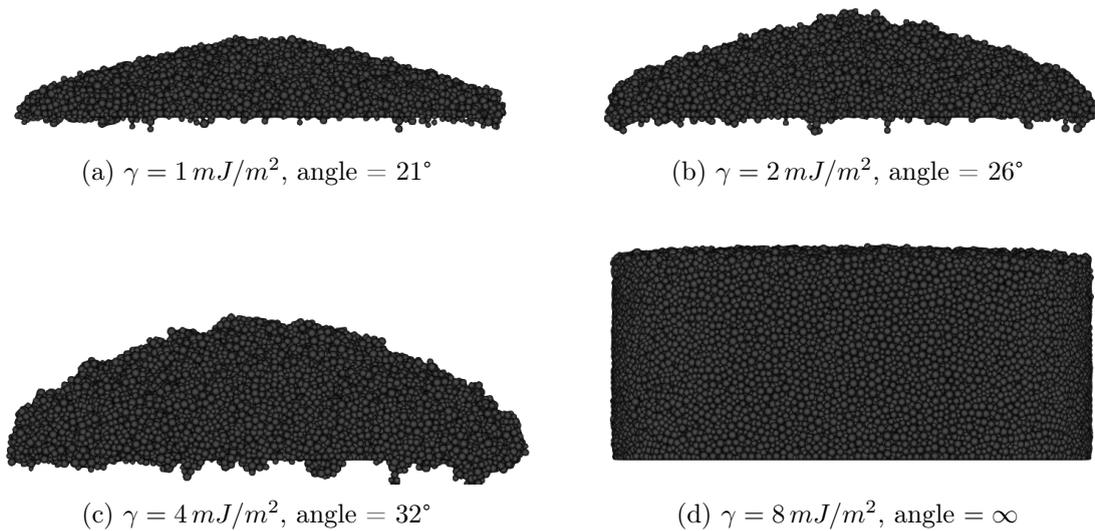


FIGURE 3.15 – Simulation d'angle de talus (vidéo)

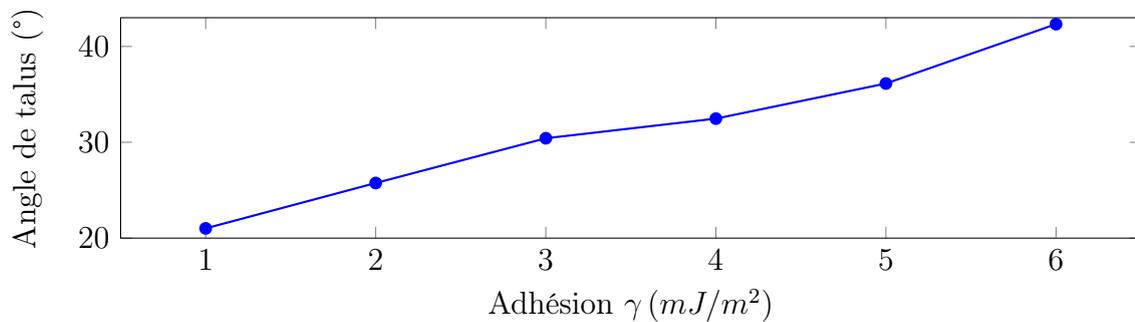


FIGURE 3.16 – Influence de l'adhésion sur l'angle de talus

3.4 Choix de l'essai de caractérisation

Un angle de talus peut être obtenu par différents moyens, l'essai le plus courant consiste à former une colonne d'un matériau granulaire puis de le laisser libre de toute contrainte pour qu'un tas soit formé, ce méthode est appelée *granular column collapse* ou effondrement de colonne granulaire [64]. Ce tas forme un cône de matière avec un angle particulier qui dépend du matériau et des conditions d'humidité. Puisque cet essai permet d'obtenir des résultats discriminatoires avec plus ou moins

d'adhésion au sein de la poudre et qu'il ne dépend pas de la géométrie, il est possible de comparer l'essai expérimental à la simulation assez facilement. La simulation d'un tel milieu granulaire étant coûteuse en calcul, il faut limiter le nombre de particules dans la simulation. L'essai « granular column collapse » provoque des vitesses élevées pour les grains de poudre qui lorsqu'ils impactent le support peuvent s'échapper et ne pas faire partie du tas de poudre. Il faut alors trouver une solution pour réduire cet effet. Ainsi, il est choisi d'utiliser un cylindre pour tenir la colonne de poudre et le faire s'élever à une faible vitesse pour retenir le mouvement et faire en sorte que les grains restent dans la zone du tas de poudre plus facilement.

Bien qu'étant plutôt éloigné du comportement de la poudre lors de l'étalement, l'essai d'angle de talus semble être le plus adapté pour déterminer l'énergie d'adhésion entre les grains de poudre. L'objectif ici est de réaliser différentes simulations avec des granulométries différentes et des valeurs d'adhésion différentes. Cela doit permettre de mettre en évidence l'effet de l'adhésion sur l'angle de talus, principalement sur les plus petites particules. Ainsi un protocole d'identification de l'énergie d'adhésion d'un échantillon de poudre pourra être développé. Cela consiste à comparer l'essai expérimental avec la simulation numérique.

3.4.1 Modélisation numérique

La géométrie de l'essai d'angle de talus étant axisymétrique, il peut être intéressant d'essayer de trouver des astuces permettant la simulation numérique d'un volume de poudre important avec un nombre de particules plus petit. En effet, cet essai numérique doit faire partie d'un protocole d'identification de la valeur d'adhésion de la poudre en réalisant plusieurs simulations, il est important de limiter le coût de calcul d'une simulation. Avec d'autres types de méthodes numériques, il est possible de réaliser des simulations 2D axisymétriques afin de calculer ce genre de cas. Ici, les particules étant en 3D et pouvant se mouvoir dans toutes les directions, cela ne peut pas être réalisé de la même manière. Cependant, il est tout de même envisageable de réaliser la simulation sur une fraction du volume seulement en utilisant des conditions périodiques spécifiques comme le montre le schéma 3.17.

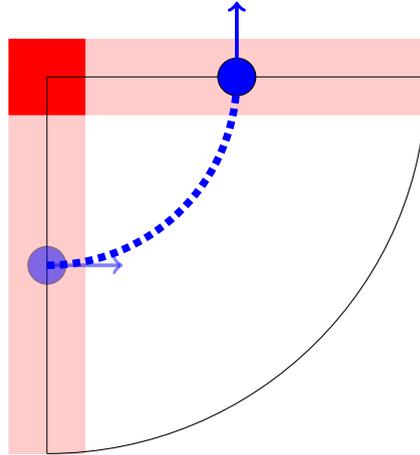


FIGURE 3.17 – Conditions périodiques d’axisymétrie

Comme dans le cas des conditions périodiques dans la largeur développées dans le chapitre 2, des marges doivent être prises en compte sur les bords du domaine. Dans le cas des conditions périodiques pour l’étalement, ces zones sont parallèles. Ici, du fait de la géométrie, il y a un recouvrement des marges vers le centre du domaine (zone rouge). Ce recouvrement implique des problèmes numériques critiques où par exemple une particule peut être en contact avec elle-même. Afin d’éviter ces problèmes numériques, une zone d’exclusion est définie au centre avec un diamètre suffisamment large afin d’interdire aux particules d’atteindre cette zone critique.

En dehors de cette zone, les particules peuvent se déplacer librement dans le domaine. La gestion des conditions périodiques diffère légèrement de celles utilisées pour simuler l’étalement puisqu’ici il est nécessaire de modifier l’orientation des vecteurs de mouvement des particules lorsqu’elles passent d’une extrémité à l’autre. En effet, dans le cas du schéma, le domaine simulé est un quart de cylindre, il y a donc un angle de 90° entre les bords du domaine. En pratique, il est possible de réaliser la simulation avec un angle beaucoup plus faible pour utiliser le moins de particules possibles. Lors de la simulation, quand il s’agit de la phase de calcul des conditions périodiques, les particules à l’intérieur des marges voient leurs vecteurs (position, vitesse, etc.) effectuer une rotation avec un angle correspondant à l’angle de section. Ceci est nécessaire dans le cas où une particule passe d’un bord à l’autre ou seulement lorsque deux particules des deux bords sont en contact pour pouvoir calculer les forces d’interaction.

Les figures 3.18, 3.19 et 3.20 montrent la simulation de l’essai d’angle de talus avec différents angles de section utilisés. La figure 3.18a représente l’essai réalisé avec la géométrie complète sans conditions périodiques, la figure 3.18b représente l’essai dans les mêmes conditions avec la même granulométrie et la même adhésion avec

une section du domaine de 90° et des conditions périodiques d'axisymétrie. Enfin la figure 3.18c représente une nouvelle fois le même essai, dans les mêmes conditions, avec une section de 45° . Comme dans la section précédente, l'échantillon étudié est borné entre 20 et $40 \mu m$. Les figures représente l'essai avec une adhésion de $4 mJ/m^2$. L'angle qui résulte de ces essais est équivalent quelle que soit la géométrie.

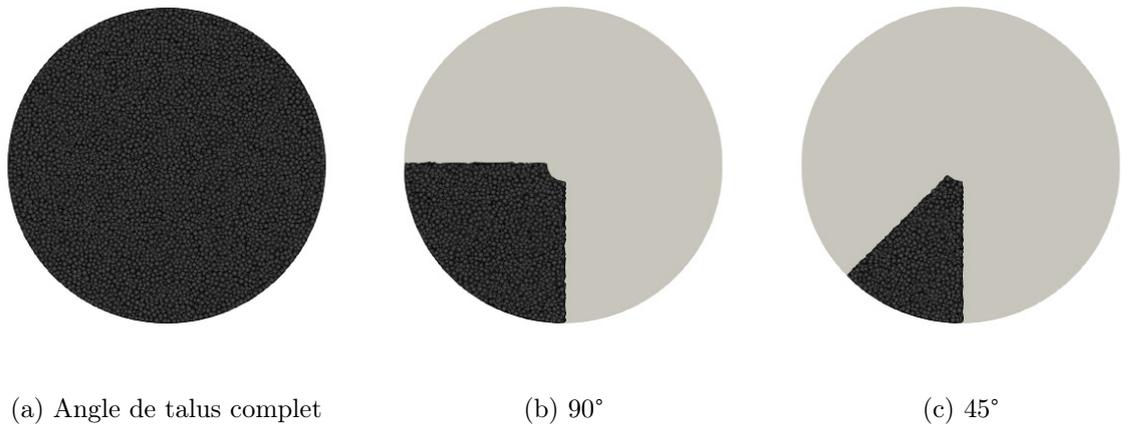


FIGURE 3.18 – Différents angles de simulation (vue de dessus)

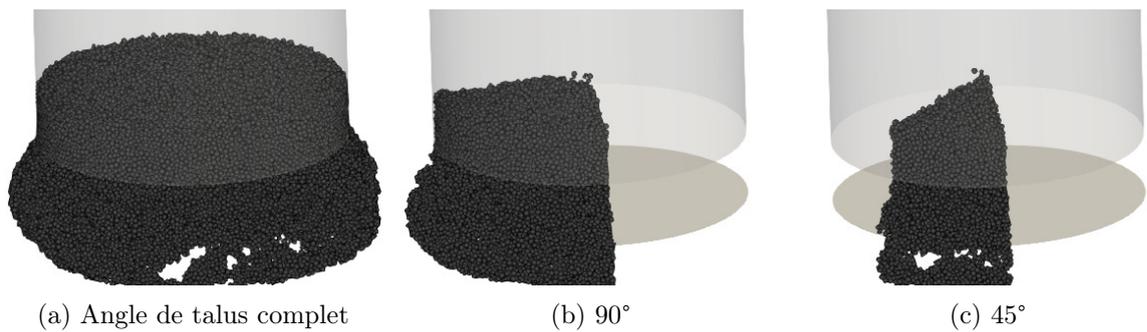


FIGURE 3.19 – Différents angles de simulation (vidéo)

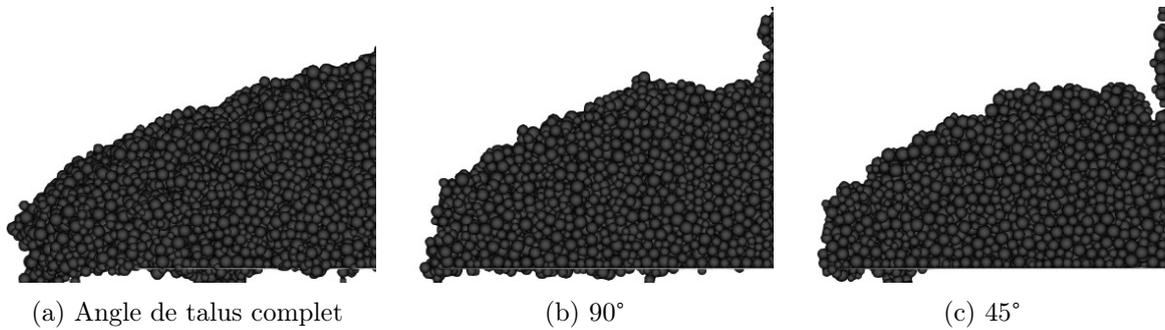


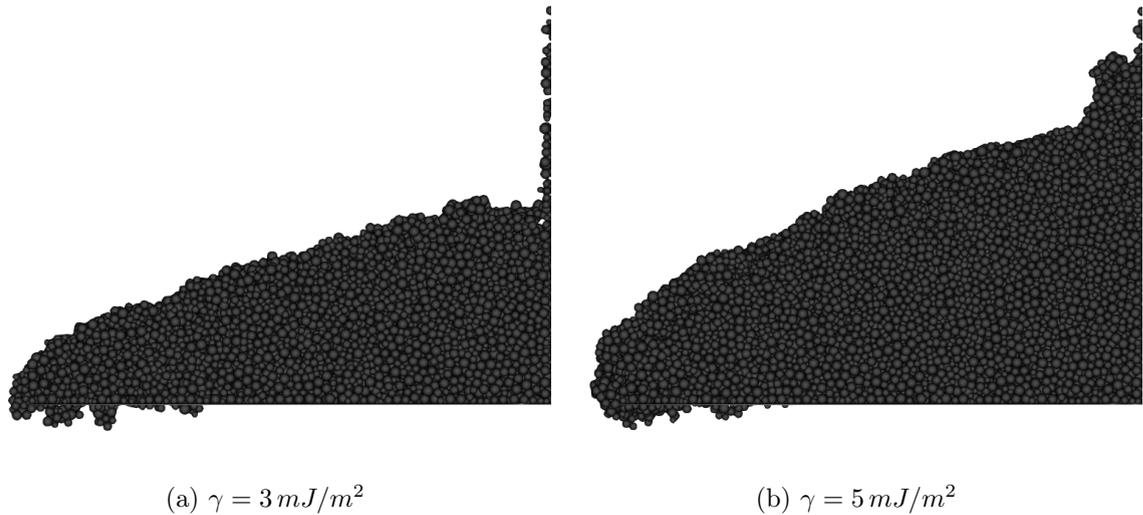
FIGURE 3.20 – Différents angles de simulation (vue de côté)

Réduire la section du domaine utilisé permet de réduire le nombre de particules utilisées (divisé par 4 avec un angle de 90° , divisé par 8 avec un angle de 45°). Ainsi, la simulation demande moins de ressources informatiques et moins de temps pour être réalisée. Le protocole de caractérisation de l'adhésion demande de réaliser plusieurs simulations d'angle de talus avec différentes adhésions pour identifier la valeur correspondant à un échantillon de poudre réel. Réduire le coût de calcul est alors primordial. Le tableau 3.2 montre le temps de calcul nécessaire pour faire la simulation sur une géométrie complète (full) et le facteur de réduction du temps de calcul réalisés avec les section 90° et 45° . Lorsque le volume du domaine est divisé par 4 ou 8, le temps de calcul est quasiment divisé par 4 ou 8 respectivement. Le temps de calcul augmente avec l'énergie d'adhésion car plus il y a d'adhésion, moins il y a de particules supprimées au cours de la simulation.

Adhésion (mJ/m^2)	Full - temps (h)	90° - facteur	45° - facteur
2	6.63	3.8	9.6
4	8.82	3.5	7.3
6	12.90	3.7	7.7
8	19.36	3.8	7.8

TABLE 3.2 – Réduction du temps de calcul

La réduction de la section simulée permet également de réaliser la simulation sur avec un diamètre plus grand. La figure 3.21 montre l'angle de talus obtenu avec la même granulométrie que les simulations précédentes avec un diamètre de 4 mm. L'angle de talus obtenu est équivalent.

FIGURE 3.21 – Diamètre = 4 mm de diamètre, angle de la section = 45°

Pour simuler de plus grandes quantités de poudre, il est possible de réduire encore l'angle de la section. En revanche, il faut que la largeur entre les limites périodiques soit assez large pour ne pas faire apparaître de problème numérique. L'idéal est d'obtenir une largeur minimal de $300 \mu\text{m}$ comme dans le cas de la simulation de l'étalement. Pour cette raison, si l'angle est plus petit comme sur la figure 3.22, la zone d'exclusion doit être plus grande afin que la largeur minimale soit supérieure à $300 \mu\text{m}$. Or, plus la zone d'exclusion est large, moins la simulation est représentative de l'essai réel.

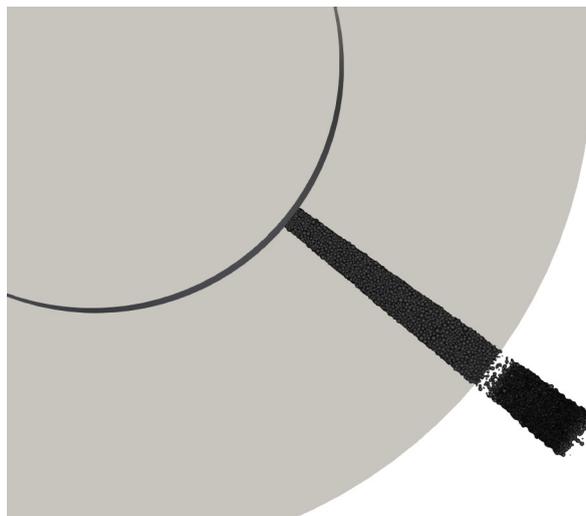


FIGURE 3.22 – Vue de dessus d'un cas avec un angle petit

Comparaison avec une étude issue de la littérature : Les figures 3.23 et 3.24 montrent des simulations d'angle de talus réalisées avec un échantillon de Ti6Al4V dont les déciles sont semblables à une distribution granulométrique utilisée par Meier et al [73] ($d_{10} = 46 \mu m$, $d_{50} = 72 \mu m$, $d_{90} = 106 \mu m$). L'échantillon de poudre est simulé par une loi normale tronquée avec les paramètres suivants : $\mu = 69 \mu m$, $\sigma = 30 \mu m$, $D_{min} = 36 \mu m$, $D_{max} = 130 \mu m$. La densité du matériau varie également par rapport aux différentes études réalisés dans ce travail. La densité utilisée ici est $\rho = 4300 kg.m^{-3}$.

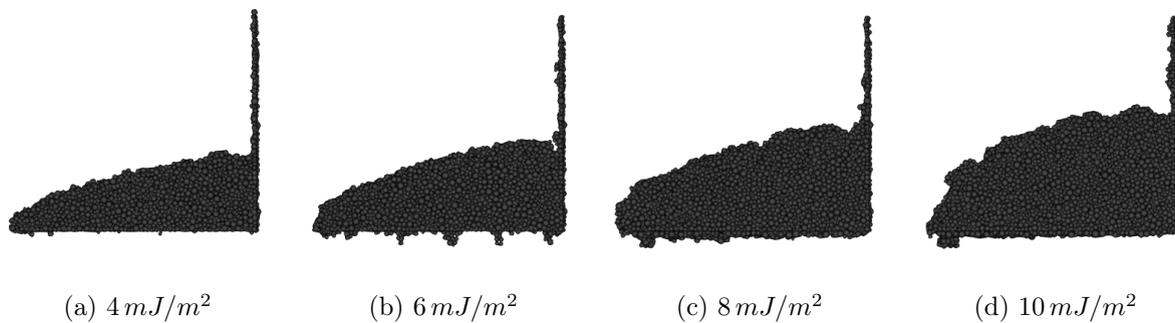


FIGURE 3.23 – Échantillon de Ti6Al4V de $d_{50} = 72 \mu m$

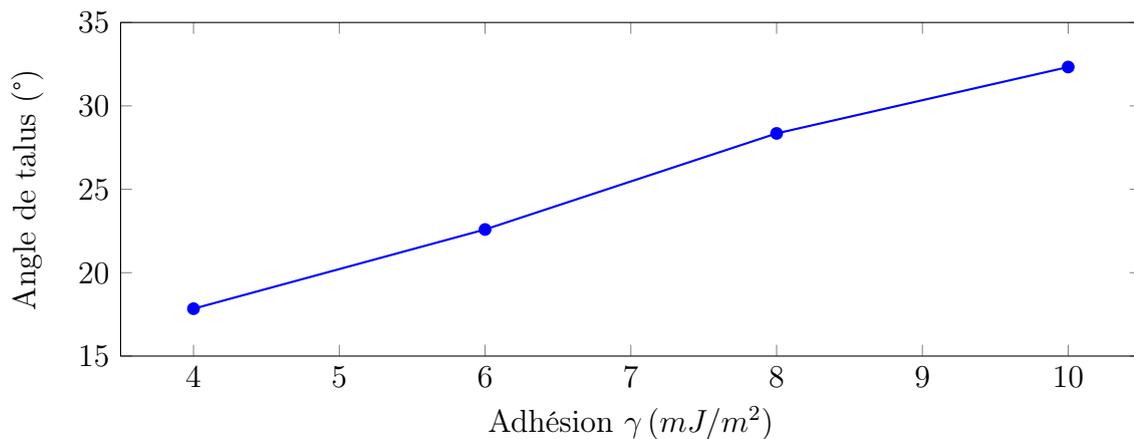


FIGURE 3.24 – Échantillon similaire à celui étudié par Meier [73]

Pour obtenir le même angle que Meier et al avec cet échantillon, il faut une valeur d'adhésion bien plus élevée que celle utilisée dans leur étude. La première raison est que le modèle d'adhésion est différent. Comme évoqué dans le chapitre 2, il existe plusieurs modèles de forme similaires pour prendre en compte l'adhésion. Meier utilise une force décrite par la relation $F_a = -4\pi\gamma R^*$. Mais en plus de cela,

la force d'adhésion agit également lorsque les particules ne sont pas en contact mais assez proches (jusqu'à $2\ \mu m$ environ). Deuxièmement, une résistance au roulement est aux particules en contact pour prendre en compte les aspérités à la surface des particules. Ces deux derniers aspects du modèle numérique contribuent au fait que l'adhésion nécessaire est plus faible que dans l'étude de la figure 3.24 pour obtenir dans angle de talus similaires. Enfin, la distribution granulométrique utilisée par Meier et al n'est connue que par ses trois déciles d_{10} , d_{50} et d_{90} ce qui rend difficile la reproduction du même échantillon.

3.4.2 Conditions axi-périodiques rectilignes

Le modèle présenté jusqu'ici permet d'obtenir de bons résultats en termes de coût de calcul et de taille de la géométrie. Cependant, si l'on veut simuler une quantité de poudre réelle, cela ne réduit pas suffisamment le nombre de particules. En effet, réduire l'angle du domaine ne suffit pas puisque plus l'angle est réduit, plus le cylindre central doit être grand pour empêcher le recouvrement des marges de périodicité. Or, on préfère avoir une zone exclusive au centre la plus petite possible pour ne pas interférer sur le résultat de la simulation. Mais avec un angle suffisamment grand, cela représente un nombre de particules toujours trop important pour les performances informatiques actuelles.

Une autre solution est alors envisagée : elle consiste à utiliser les conditions périodiques d'axisymétrie sur un domaine de petite largeur avec des bords parallèles (figure 3.25).

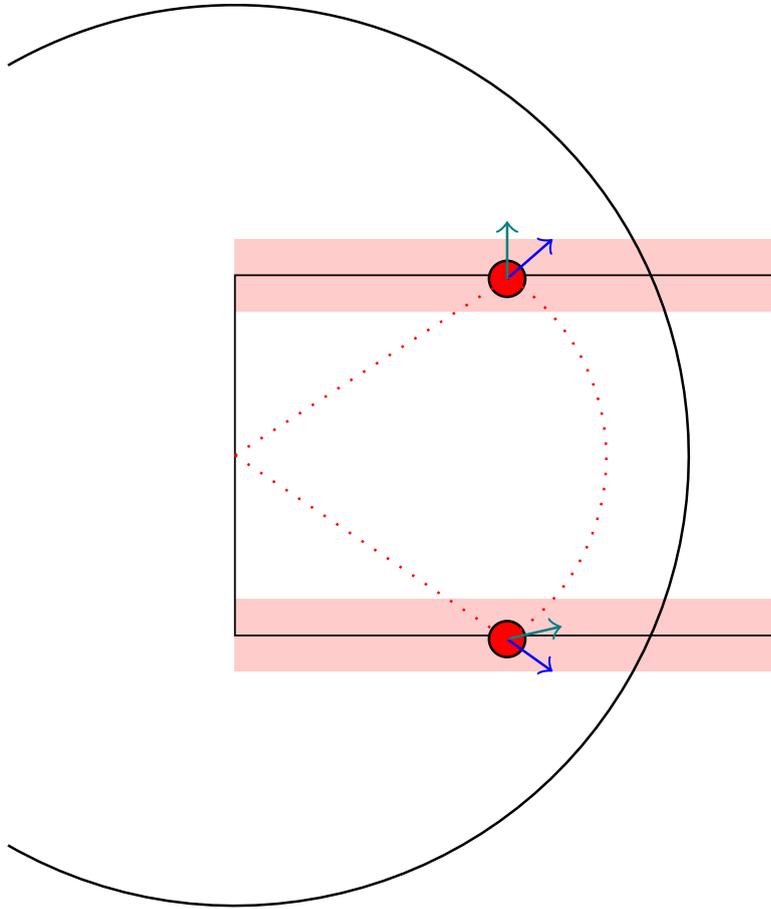
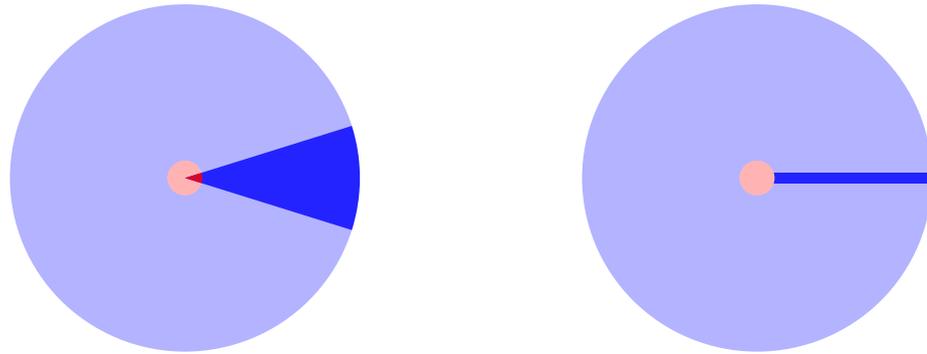


FIGURE 3.25 – Conditions périodiques rectilignes

L'objectif étant de réduire la zone du domaine simulée, tout en maintenant l'axisymétrie de l'essai. Avec une largeur semblable à celle utilisée lors de la simulation de l'étalement, la réduction du volume simulé est significative et rend possible la simulation d'un essai réel.

Par exemple, considérons un cas de simulation d'angle de talus avec un support de 1 cm de diamètre, on définit le diamètre de la zone d'exclusion au centre égal à 1 mm. On définit une hauteur de poudre telle qu'il soit possible d'obtenir un angle de talus de 70° . Pour la méthode de simulation avec les conditions périodiques d'axisymétrie, il faut que l'angle du domaine soit assez grand pour garantir une largeur de domaine d'au moins $300 \mu m$ pour éviter les problèmes numériques liés à la périodicité. Au final, le volume de poudre à simuler est de $170 mm^3$, ce qui est difficilement réalisable en terme de coût de calcul. Dans le cas de la nouvelle méthode présentée, la largeur du domaine est de $300 \mu m$ sur tout le domaine. Pour les mêmes conditions de géométrie, le volume de poudre à simuler est seulement de

19 mm^3 , ce qui est bien plus raisonnable pour la simulation. La figure 3.26 montre la différence de volume à simuler (identifié en bleu foncé).



(a) Conditions périodiques d'axisymétrie (b) Conditions axi-périodiques rectilignes

FIGURE 3.26 – Schéma de la surface de calcul

Cette méthode permet donc de simuler une géométrie plus grande avec moins de particules. Ici, les vecteurs de mouvement des particules subissent également des rotations lors du calcul des contacts et des forces. L'angle de la rotation dépend de la position radiale de la particule par rapport au centre du domaine. Dans chaque cas il est alors nécessaire de calculer l'angle de rotation que doit subir la particule. Le schéma de la figure 3.27 montre les angles permettant de réaliser ce calcul.

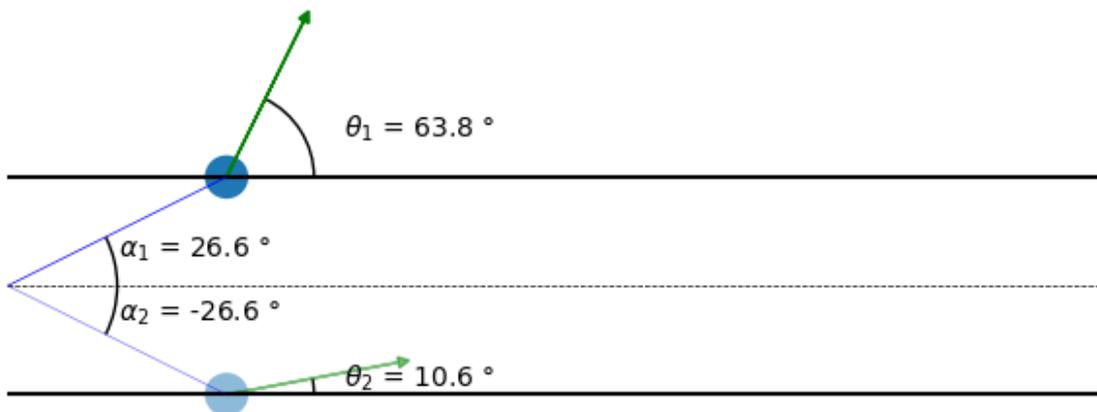


FIGURE 3.27 – Application des conditions périodiques aux vecteurs

La particule en question possède une vitesse selon une certaine direction. Cette direction est notée par l'angle θ_1 . L'angle α_1 est l'angle entre le centre de la particule

et le centre du domaine par rapport à l'horizontale. L'angle α_2 est l'angle de la position après le déplacement de la particule via les conditions périodiques. Enfin, l'angle θ_2 est l'angle de la nouvelle direction du vecteur vitesse de la particule et est calculé par la relation 3.3.

$$\theta_2 = \theta_1 - (\alpha_1 - \alpha_2) \quad (3.3)$$

Dans ce cas il y a donc également un cylindre central dont la taille dépend de la largeur du domaine. Selon l'angle de sortie du domaine périodique et la position de la particule, il se peut que l'angle de rentrée à l'autre bord du domaine soit orienté vers l'extérieur (Figure 3.28). Dans un tel cas, la particule ne rentre jamais dans le domaine. Elle est alors supprimée. La perte de matière correspond à la densité de particules qui diminue à mesure que l'on s'approche de l'extérieur du domaine. L'angle critique diminue avec la distance par rapport au centre du plateau.

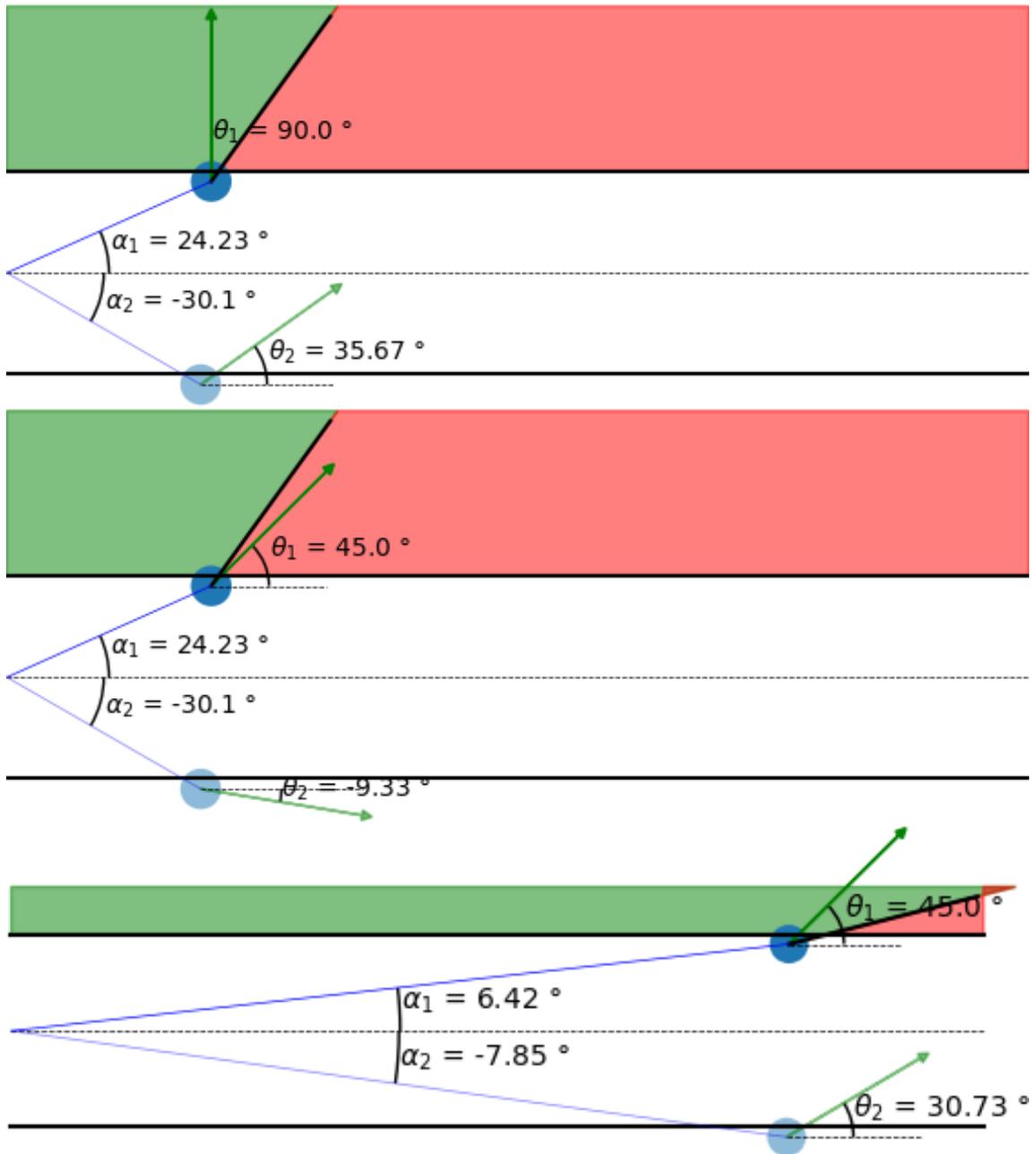


FIGURE 3.28 – Angle critique

Comme dans les cas précédents, on peut observer l'effet de l'adhésion sur l'angle de talus avec des simulations réalisées avec les conditions axi-périodiques rectilignes sur la figure 3.29.

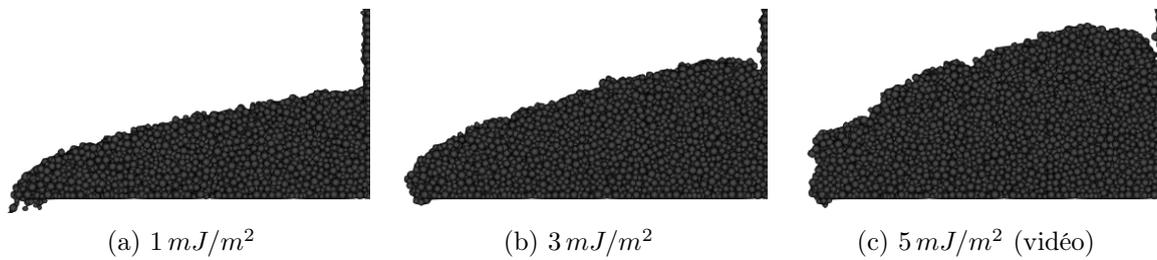


FIGURE 3.29 – Effet de l’adhésion avec les conditions axi-périodiques rectilignes

3.4.3 Conclusion

L’objectif de cet essai était de proposer une méthode expérimentale permettant d’identifier la valeur du paramètre d’adhésion du modèle numérique. Une méthode numérique a été développée et permet de réaliser une simulation avec une géométrie de la même taille que l’essai réel. En revanche, les essais expérimentaux menés en parallèle du développement de cette méthode ont donné des résultats en désaccord avec les résultats attendus et observés précédemment (résultats expérimentaux disponibles en annexes). La configuration de l’essai et la réalisation manuelle sont peut être la cause de ces résultats qui ne permettent pas de les traiter en comparaison avec la simulation. Cependant, l’étude de Meier et al [73] montre bien qu’il est possible d’identifier la valeur d’adhésion grâce à la réalisation d’essais d’angle de talus. Les résultats des modèles avec frontières périodiques montrent que la simulation retrouve bien une variation de l’angle de talus avec l’adhésion comme dans la littérature. De plus, le nombre de particules grandement réduit par rapport à une simulation de la géométrie complète permet de réaliser des simulations bien plus rapidement. Il faut maintenant développer un essai expérimental pour caractériser l’adhésion des poudres.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a montré qu’il était très difficile de mettre en place un essai expérimental et une simulation équivalente afin de caractériser les paramètres matériaux de la poudre pour les intégrer dans le modèle numérique. Parmi les principales difficultés rencontrées il y a la différence de géométrie entre l’essai expérimental qui nécessite une quantité de poudre très grande et la simulation qui est limitée par le nombre de particules qui demande des capacités informatiques et un temps de

calcul trop importants. Une autre difficulté vient du fait que les interactions entre les particules et les dispositifs expérimentaux (parois du tambour tournant ou parois du cône) ont un impact sur les résultats de l'essai. Or ces interactions n'apportent que des inconnues supplémentaires au problème puisque l'objectif est d'identifier seulement les interactions grain/grain. Finalement, l'essai qui semble être le mieux adapté à cet objectif est celui de l'angle de talus puisqu'il n'y a que des interactions grain/grain lorsque le tas de poudre est formé.

Ici l'objectif était seulement d'identifier les paramètres matériaux pour les interactions grain/grain. Il s'agit en effet du type d'interaction le plus courant lors de l'étalement. Cependant, la simulation prend également en compte les interactions des grains avec le racleur, le plateau et les autres surfaces qui sont présentes lors d'un étalement réel. Or, les paramètres de ces interactions ne sont pas identifiés ici. En effet, la priorité est donnée à la caractérisation des interactions grain/grain qui représentent la majeure partie des interactions dans une simulation d'étalement.

Chapitre 4

Simulation et compréhension de l'étalement

Résumé

Ce chapitre a pour but de comprendre l'influence de différents paramètres du procédé d'étalement de poudre sur la qualité finale du lit de poudre. Ce dernier doit être dense et homogène pour que la phase de fusion laser se passe de manière optimale et éviter l'apparition de défauts dans la pièce en fabrication. Premièrement, il faut définir comment mesurer la qualité du lit de poudre. Ce chapitre commence par décrire comment sont déterminés la densité et le nombre de coordination au sein du lit de poudre. Puis l'étude de l'influence de la vitesse du racleur montre que plus l'étalement est lent, meilleure est la qualité du lit de poudre puisque la densité et le nombre de coordination sont plus élevés. Ensuite, l'étude de l'influence de l'écart-type de la distribution granulométrique montre qu'un écart-type faible permet d'obtenir un meilleur lit de poudre. Ce résultat inattendu interroge sur le paramètre responsable de cet effet. Une étude paramétrique est alors menée en couplant différents paramètres (taille de grain, rugosité de surface, épaisseur de lit de poudre). Le nombre de résultats à analyser produits par cette étude demande de trouver une méthode de caractérisation de la qualité plus adaptée pour discriminer les lits de poudre obtenus. Deux méthodes sont envisagées : la première est une mesure de la densité par analyse d'image, la seconde est le calcul de la diffusivité thermique du lit de poudre. Ces méthodes sont efficaces et permettent d'analyser les résultats d'études paramétriques supplémentaires.

Sommaire

4.1	Études de l'influence de paramètres procédé	117
4.1.1	Vitesse du racleur	117
4.1.2	Granulométrie	118
4.2	Caractérisation de la qualité du lit de poudre	120
4.2.1	Évaluation de la densité par analyse d'image	121
4.2.1.1	Protocole d'analyse par seuillage en vue de dessus	121
4.2.1.2	Profilométrie	121
4.2.2	Mesure de la diffusivité thermique	122
4.2.2.1	Méthode Flash	123
4.2.2.2	Modèle numérique	123
4.3	Analyse des paramètres procédé	127
4.3.1	Définition d'un paramètre réduit	127
4.3.2	Rugosité	129
4.3.3	Granulométrie	131
4.3.4	Adhésion	133
4.3.5	Vitesse racleur	134
4.4	Conclusion	137

4.1 Études de l'influence de paramètres procédé

Les études présentées dans cette partie consistent à faire varier la valeur d'un paramètre procédé pour observer son effet sur la qualité du lit de poudre. Lorsqu'un paramètre varie, tous les autres paramètres sont fixes. Le tableau 4.1 répertorie les valeurs des paramètres utilisés par défaut.

	Paramètre	Valeur
ρ	Masse volumique (kg/m^3)	8000
μ	Diamètre moyen (μm)	30
σ	Écart-type (μm)	10
D_{min}	Diamètre minimum (μm)	7
D_{max}	Diamètre maximum (μm)	70
e	Épaisseur (μm)	60
Rugosité	\varnothing élément discret (μm)	30
γ	Énergie surfacique d'adhésion (mJ/m^2)	0
V	Vitesse du racleur (mm/s)	100

TABLE 4.1 – Valeurs des paramètres procédé utilisées par défaut

4.1.1 Vitesse du racleur

Afin d'observer l'influence de la vitesse du racleur sur les propriétés finales du lit de poudre, plusieurs simulations ont été réalisées avec différentes vitesses (50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225 et 250 mm/s). La figure 4.1 montre l'évolution de la densité, de la taille moyenne des grains et du nombre de coordination en fonction de la position pour les vitesses suivantes : 50, 100, 150, 200 et 250 mm/s . Comme prévu, plus l'étalement est lent, meilleure est la densité du lit de poudre et plus le nombre de coordination est élevé. En effet, la densité obtenue pour une vitesse de 50 mm/s dépasse 60% alors que pour la vitesse supérieure (250 mm/s), le lit de poudre est moins dense (40% - 50%). Les valeurs mesurées aux première et dernière positions ne sont pas les données les plus représentatives puisqu'elles correspondent à l'absence de matière causée par l'inertie des grains pour le premier cas et par la chute des grains au-delà de la plaque pour le second. De plus, à des vitesses élevées, le lit de poudre n'est pas homogène. Le profil de la courbe de densité est irrégulier par rapport aux vitesses les plus lentes.

Le nombre de coordination dépend également de la vitesse du racleur puisqu'un étalement à 50 mm/s permet d'obtenir le meilleur nombre de coordination moyen

(autour de 6). Enfin, la taille moyenne des grains augmente légèrement en fonction de la position dans le lit de poudre pour les vitesses les plus élevées. Il pourrait s'agir du phénomène de ségrégation car les plus petites particules se trouvent principalement au début du lit de poudre. Cette étude montre également que la densité évolue comme le nombre de coordination dans ce cas contrairement à l'étude de l'influence de l'adhésion (Chapitre 3). Le nombre de coordination peut être considéré comme une densité locale.

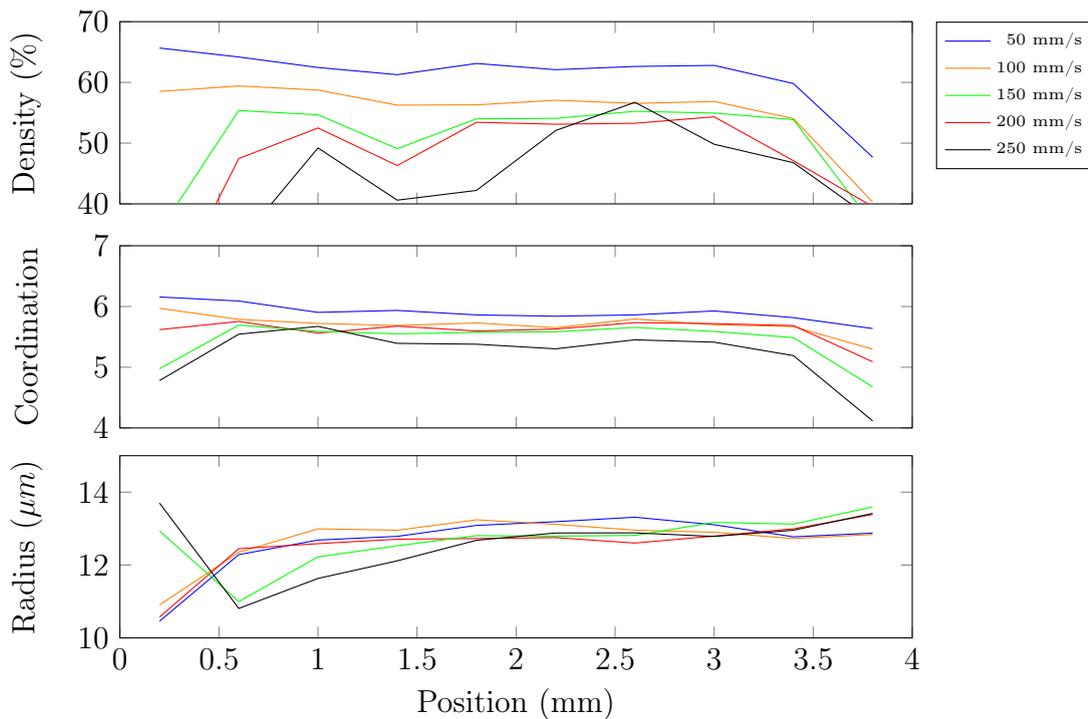


FIGURE 4.1 – Vitesse du racleur

4.1.2 Granulométrie

Un autre paramètre procédé important est la granulométrie de la poudre utilisée. En effet, selon la distribution granulométrique de l'échantillon étudié, le lit de poudre obtenu peut être très différent. Dans un échantillon de poudre, tous les grains n'ont pas la même taille. En général, la distribution granulométrique suit une loi de distribution semblable à une loi log-normale. Il est souvent admis que dans un milieu granulaire 3D, la présence de particules de différentes tailles permet d'obtenir une bonne densité puisque les petites particules comblent les vides laissés par les plus grandes (figure 4.2).

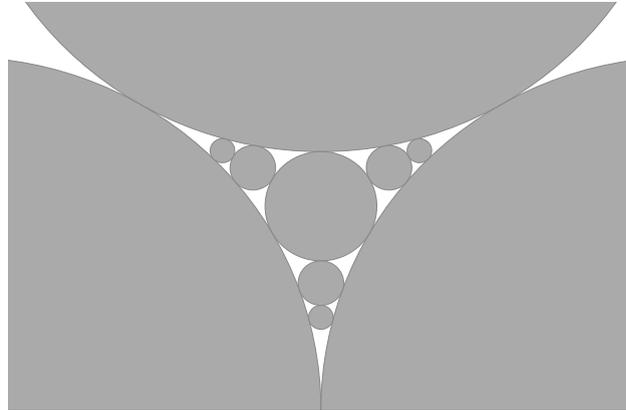


FIGURE 4.2 – Milieu granulaire dense grâce aux petites particules

Ainsi, il peut être intéressant d'étudier l'influence de la largeur de la distribution granulométrique sur la qualité du lit de poudre. Cette étude est réalisée en simulant divers étalements de poudre avec des granulométries suivant une loi normale en faisant varier l'écart-type. La taille moyenne des grains est de $30 \mu m$ et l'écart-type varie de 0 à $15 \mu m$. La figure 4.3 montre les lits de poudre obtenus en vue de dessus.

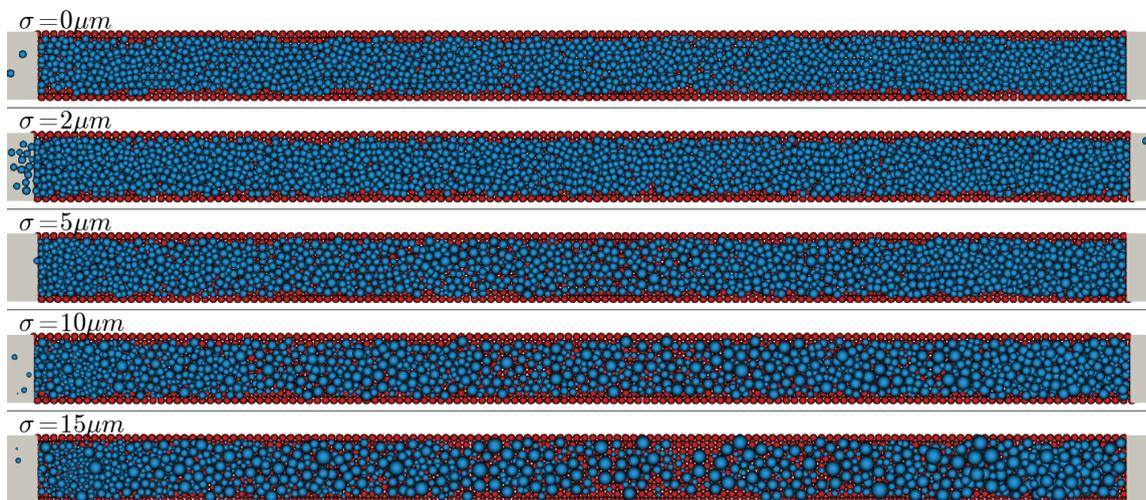


FIGURE 4.3 – Effet de l'écart-type de la distribution granulométrique sur l'étalement

Il est clair que plus l'écart-type est faible meilleur est le lit de poudre. Ce résultat semble donc étonnant. Cependant, il s'agit peut-être d'une particularité liée au fait que le lit de poudre étalé est très peu épais (deux fois la taille moyenne d'un grain). Ainsi, un écart-type élevé favorise un nombre élevé de grandes particules dont la taille ne permet d'avoir qu'une seule particule dans la hauteur du lit de poudre, ce qui impacte la densité finale. Il est alors difficile d'obtenir un empilement de sphères de tailles différentes sur de si faibles épaisseurs. Ce résultat est peut-être également

lié à la rugosité du plateau, modélisé par des sphères de même taille organisées pour former une surface rugueuse. Lorsque l'écart-type de la distribution granulométrique est faible, cela pourrait favoriser un empilement régulier des grains de poudre, ce qui résulte en un meilleur lit de poudre.

Afin de mieux comprendre ce résultat, une étude sur l'influence de la rugosité, de la taille des grains et de l'épaisseur de lit de poudre et les éventuels couplages entre ceux-ci est nécessaire. L'étude du couplage de ces trois paramètres va générer un nombre important de résultats.

4.2 Caractérisation de la qualité du lit de poudre

La qualité du lit de poudre peut être caractérisée via la densité et le nombre de coordination comme réalisé jusqu'à maintenant. Cependant, il arrive que le nombre de coordination soit élevé alors que la densité est plutôt faible comme c'est le cas dans l'étude sur l'influence de l'adhésion. En effet, une adhésion élevée forme des amas de particules, ce qui résulte en un nombre de coordination élevé mais cela laisse apparaître des cavités au sein du lit de poudre, la densité est donc impactée. Il n'est donc pas toujours évident de prédire si un lit de poudre est bon vis à vis de la phase d'interaction laser-matière. De plus, la méthode employée jusqu'ici génère plusieurs résultats (plusieurs valeurs de densité et de nombre de coordination en fonction de la position). Lorsque l'on souhaite analyser les résultats d'une étude paramétrique avec un nombre importants de simulations réalisées on souhaite plutôt n'avoir qu'une seule valeur caractérisant la qualité du lit de poudre pour faciliter l'analyse des résultats.

Ce procédé de fabrication nécessite d'avoir un lit de poudre dense et homogène en vue de la phase de fusion laser pour que l'interaction laser-matière soit de la meilleure qualité possible. On a alors besoin d'une propriété discriminante sur la qualité du lit de poudre en relation avec l'interaction laser-matière. Par quel moyen peut-on mesurer la qualité du lit de poudre ? Deux solutions sont envisagées : la première est l'évaluation de la densité du lit de poudre par analyse d'image en vue de dessus, la deuxième est le calcul de la diffusivité thermique. Une diffusivité thermique élevée est synonyme d'un lit de poudre dense et homogène dont les contacts entre les grains sont nombreux pour diffuser la chaleur.

4.2.1 Évaluation de la densité par analyse d'image

4.2.1.1 Protocole d'analyse par seuillage en vue de dessus

Certaines machines de fabrication additive évaluent la qualité de l'étalement grâce à une caméra située au-dessus de la zone d'étalement pour observer s'il y a des zones où il manque de la poudre. Le cas échéant, la machine procède à une nouvelle phase d'étalement jusqu'à ce que le lit de poudre soit d'assez bonne qualité. La même chose peut être imaginée numériquement pour analyser rapidement la qualité d'un lit de poudre simulé. Il s'agit de produire une image en deux dimensions (vue de dessus) du lit de poudre. En effet, connaissant la taille et la position exacte des grains de poudre, il est facile de générer une telle image à l'aide d'un script Python en dessinant des disques (en bleu sur la figure 4.4) illustrant chacun un grain de poudre. Puis un deuxième script analyse le nombre de pixels colorés par rapport au nombre de pixels blancs. Un pixel blanc correspondant à une zone sans grain de poudre sur toute la hauteur du lit de poudre. Ainsi, un lit de poudre dense et homogène présentera un taux de pixels colorés plus important qu'un mauvais lit de poudre. La figure 4.4 montre la différence entre un bon et un mauvais lit de poudre.



(a) Taux de pixels non blancs : 50.2%



(b) Taux de pixels non blancs : 99.9%

FIGURE 4.4 – Analyse d'image du lit de poudre

4.2.1.2 Profilométrie

La méthode précédente est efficace lorsqu'il s'agit de comparer des lits de poudre de mauvaise qualité où il y a beaucoup de manque de matière. En revanche, lorsqu'un lit de poudre est bon, l'image qui résulte de l'analyse est pratiquement remplie de pixels colorés ce qui rend la comparaison difficile avec plusieurs lits de poudre dans le même cas. En effet, cette méthode ne prend pas en compte le nombre de particules dans l'épaisseur.

Un calcul numérique de la profilométrie du lit de poudre pourrait éventuellement permettre d'améliorer cette méthode. La figure 4.5 montre la profilométrie du lit de

poudre en vue de dessus sur la partie supérieure de l'image. La partie inférieure de l'image est l'échelle de couleur de l'altitude au sein du lit de poudre. Pour réaliser cela, un maillage 2D fin est généré sur toute la zone du lit de poudre. Chaque nœud de ce maillage peut rencontrer plusieurs grains de poudre. Le point le plus haut est calculé pour chaque nœud. Pour un nœud donné, le calcul se fait simplement en imaginant une ligne verticale qui part de ce nœud et qui intercepte une ou plusieurs particules. Il suffit de déterminer l'altitude de chaque intersection et de récupérer l'altitude maximale.

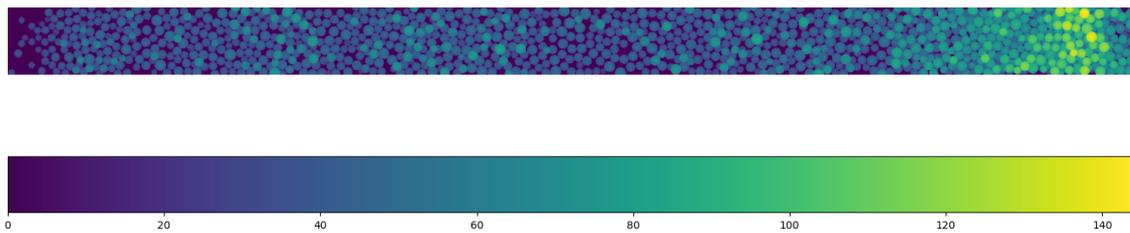


FIGURE 4.5 – Profilométrie numérique d'un lit de poudre simulé (échelle de couleur en bas)

On observe notamment que la profilométrie montre une bonne homogénéité au sein du lit de poudre sauf en fin d'étalement (à droite de l'image) où l'épaisseur est plus importante en raison de la présence du mur au bout du plateau qui provoque une accumulation de matière sur cette zone.

4.2.2 Mesure de la diffusivité thermique

Une autre manière de caractériser la qualité du lit de poudre est de calculer la diffusivité thermique de celui-ci. En effet, l'intérêt d'étudier l'étalement de la poudre dans le procédé de fusion laser sur lit de poudre est de comprendre comment produire un bon lit de poudre pour que la phase de fusion laser soit optimale. Or, un bon lit de poudre doit être dense et homogène pour bien conduire la chaleur.

Il existe plusieurs moyens de mesurer expérimentalement la diffusivité thermique d'un matériau (méthode Flash [105], méthode du fil chaud [106], méthode de la plaque chaude gardée [107], ...). Ces méthodes sont surtout appliquées sur des milieux continus. L'objectif est d'adapter une de ces méthodes à un milieu granulaire pour calculer la diffusivité thermique du lit de poudre.

4.2.2.1 Méthode Flash

La méthode la plus connue pour réaliser cela est sans doute la méthode flash. Celle-ci consiste à appliquer un flux de chaleur pendant un court instant sur une face de l'échantillon et mesurer l'évolution de la température en fonction du temps sur la face opposée [108]. Avec le profil de température analytique [109] et l'évolution de la température en fonction du temps, la diffusivité thermique est reliée par la relation $a = 0.1388 \frac{d^2}{t_{1/2}}$ à $t_{1/2}$ correspond au temps nécessaire pour atteindre la moitié de la variation maximale de la température.

La solution choisie pour mesurer la qualité du lit de poudre se base sur la méthode flash. Cependant, l'épaisseur du lit de poudre étant très faible (quelques dizaines de microns) et le matériau étant sous forme granulaire, il n'est pas possible de réaliser la méthode de la même façon. Il faut alors développer un modèle spécifique.

4.2.2.2 Modèle numérique

La diffusion de la température au sein du lit de poudre est modélisée simplement par l'équation de la chaleur (équation (4.1)).

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T \quad (4.1)$$

où ρ est la densité du matériau (en $kg.m^{-3}$), C_p est sa capacité thermique massique (en $J.K^{-1}.kg^{-1}$), λ est sa conductivité thermique (en $W.m^{-1}.K^{-1}$), $\frac{\partial T}{\partial t}$ est la dérivée partielle du champ de température par rapport au temps et ΔT est le laplacien de la température.

La température est supposée homogène au sein d'un grain. Seule la conduction thermique est prise en compte, il n'y a pas de convection ou de rayonnement. Afin d'avoir un modèle simplifié, aucun échange thermique avec le gaz extérieur n'est considéré. Il n'y a donc une diffusion de chaleur seulement lorsqu'il y a un contact entre les grains.

Soit deux grains en contact, de rayons respectifs R_i et R_j , la variation de température du grain i est calculée par : $\Delta T_{ij} = \frac{(T_j - T_i) \pi R^*{}^2 c_a}{d_{ij} V_i}$ [110] avec $R^* = \frac{R_i R_j}{R_i + R_j}$ le rayon équivalent des deux grains en contact, d_{ij} la distance entre les centres des grains, V_i le volume du grain. Le coefficient $c_a = 0.1$ permet d'appliquer artificiellement une surface de contact plus importante que la réalité pour accélérer la diffusion thermique et réduire le temps de calcul. Un autre coefficient est utilisé pour augmenter la sphère d'influence des grains afin que deux grains proches mais pas en

contact puissent quand même avoir une interaction thermique. Il s'agit du coefficient d'interaction. Cela permet notamment de diffuser la température au sein de petits grains qui peuvent se retrouver dans la rugosité de la surface rugueuse sans aucun contact avec le reste du lit de poudre. Le coefficient d'interaction est pris égal à 1.2.

Lorsque la variation de température est calculée pour chaque paire de grains en contact, il faut procéder à l'intégration numérique. Un grain peut être en contact avec plusieurs grains à la fois, il suffit d'ajouter les variations de températures calculées. L'équation 4.1 s'exprime de manière discrète par l'équation 4.2.

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \frac{\lambda}{\rho C_p} \Delta t \sum_j^{n_c} \Delta T_{ij} \quad (4.2)$$

où T_i^n est la température de la particule i à l'itération n , Δt est le pas de temps (en s) et ΔT_{ij} est la différence de température entre les particules en contact i et j .

Plusieurs solutions ont été envisagées pour réaliser cette simulation. En accord avec la méthode Flash, la première méthode envisagée consistait à appliquer une température initiale à la surface de lit de poudre (Figure 4.6) en fonction de la hauteur des grains et mesurer l'évolution de la température du plateau. Cependant, comme chaque lit de poudre est différent, ce n'est pas la même quantité de chaleur qui est appliqué à chaque fois.

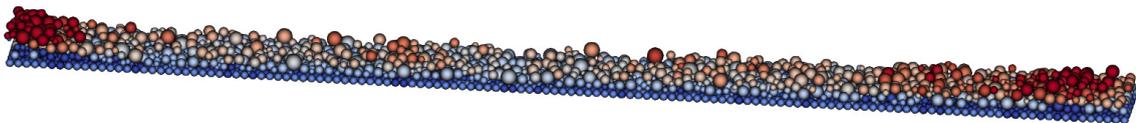


FIGURE 4.6 – Température initiale à la surface du lit de poudre

Il est alors choisi d'appliquer plutôt une température initiale au plateau et d'observer l'évolution de la température au sein du plateau (Figure 4.7). Ainsi, dans les cas où le plateau est le même, la quantité de chaleur est la même. Contrairement à la méthode flash, la courbe attendue est donc une courbe décroissante mais le principe reste le même, il est toujours possible d'obtenir le $t_{1/2}$.

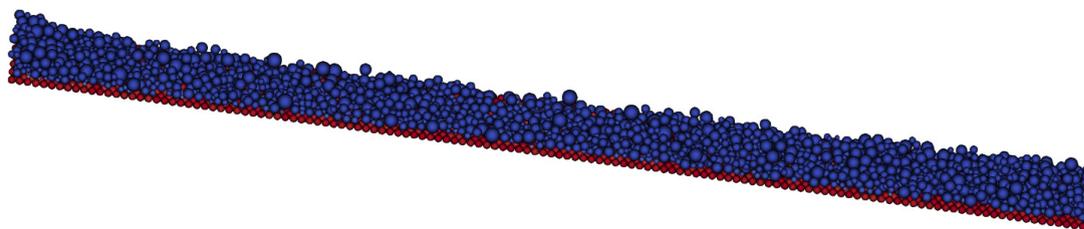


FIGURE 4.7 – Température initiale dans le plateau

Finalement, la solution choisie consiste à ne pas prendre en compte le plateau qui peut varier notamment dans l'analyse de l'effet de la rugosité de surface, ce qui peut rendre la comparaison des résultats plus difficiles. A l'état initial, une quantité de chaleur est appliquée sur une zone carrée au milieu du lit de poudre (en rouge sur la figure 4.8). Cette zone est choisie de façon arbitraire, il s'agit simplement d'apporter une quantité de chaleur bien définie au domaine. De même, la quantité de chaleur est définie de manière arbitraire $Q = 2.10^{-5} J$.

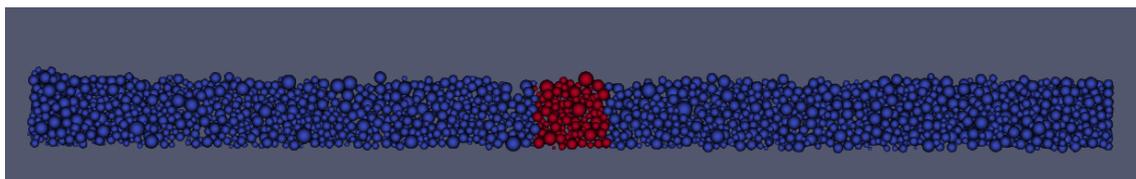


FIGURE 4.8 – Solution choisie (vidéo)

Cette quantité de chaleur correspond à une température initiale pour la quantité de matière considérée. En effet, il est important d'appliquer une quantité de chaleur initiale plutôt qu'une température initiale puisque selon les lits de poudre, il n'y a pas la même quantité de matière dans la zone sélectionnée. La température initiale est donc déterminée par la relation $T_i = \frac{Q}{mC_p}$ où T_i est la température initiale, m la masse de poudre dans la zone et C_p la capacité thermique. Hors de cette zone, la température est nulle. Lorsque la simulation est lancée, la température se diffuse alors au sein du lit de poudre.

L'évolution de la température dans la zone du milieu est mesurée et diminue au fil du temps jusqu'à atteindre une température homogène dans tout le lit de poudre (figure 4.9). Connaissant la masse totale des grains dans le lit de poudre, la température finale théorique peut être calculée puisque la quantité de chaleur reste constante (équations 4.3 et 4.4).

$$Q = m_z C_p T_i = m_T C_p T_f \quad (4.3)$$

$$T_f = T_i \frac{m_z}{m_T} \quad (4.4)$$

Il ne s'agit que de la température finale théorique puisque cela suppose que tous les grains forment un ensemble de contacts pour permettre la conduction thermique partout. Or en pratique, il se peut que certains grains ou groupes de grains ne soient pas connectés avec le reste du lit de poudre comme dans le cas des mauvais étalements où il peut y avoir des manques de matière ou encore des petites particules qui se glissent dans les interstices créés par la rugosité de surface.

Comme pour la méthode Flash, puisque la température finale théorique est connue, il est facile de déterminer la température $T_{1/2}$. Le temps $t_{1/2}$ correspond au temps nécessaire pour que la température atteigne $T_{1/2}$.

Comme la méthode utilisée fait intervenir des coefficients numériques spécifiques à cette simulation (coefficient d'interaction et l'aire de contact), il ne s'agit pas exactement de la température qui est diffusée au sein du lit de poudre. Le calcul du $t_{1/2}$ peut être rapporté à une certaine diffusivité mais il ne s'agit pas de la diffusivité thermique. La diffusivité thermique ne peut alors pas être mesurée directement. En revanche, le calcul du $t_{1/2}$ peut permettre de comparer les lits de poudre entre eux et de conclure sur la diffusivité relative de chacun par rapport aux autres. En effet, on peut rapporter la quantité $\frac{1}{t_{1/2}}$ à la diffusivité. Lorsque $\frac{1}{t_{1/2}}$ est grand, la diffusivité est élevée et inversement.

La figure 4.9 montre l'évolution de la température au sein de la zone initialement chauffée. Lorsque la température atteint $T_{1/2}$ le calcul s'arrête et $t_{1/2}$ est connu. Dans le cas d'un mauvais lit de poudre, il se peut que la température n'atteigne jamais $T_{1/2}$ car la température finale théorique est calculée à partir de l'ensemble des grains du lit de poudre. Or, quand le lit de poudre est de mauvaise qualité, tous les grains ne font pas partie du même réseau de contacts, la température ne se diffuse alors pas partout. Dans un tel cas, la température atteint une limite, lorsque celle-ci ne varie plus au sein du lit de poudre, le calcul s'arrête et le $t_{1/2}$ vaut l'infini.

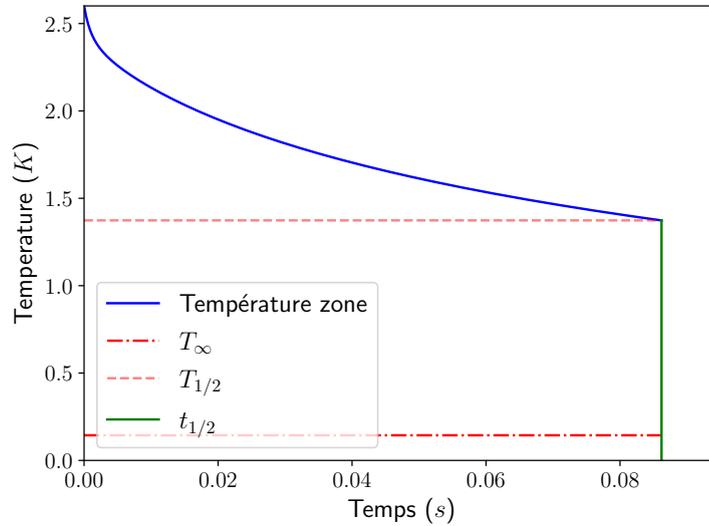


FIGURE 4.9 – Évolution de la température en fonction du temps

4.3 Analyse des paramètres procédé

Les trois méthodes présentées précédemment sur l'analyse d'image du lit de poudre, la profilométrie et le calcul de la diffusivité thermique permettent d'analyser la qualité du lit de poudre. La complémentarité entre la méthode d'analyse d'image et le calcul de diffusivité fait que ce sont les méthodes retenues pour analyser l'effet des paramètres procédés présentés par la suite.

4.3.1 Définition d'un paramètre réduit

Suite à l'analyse de l'effet de l'écart-type de la distribution granulométrique sur la qualité du lit de poudre, une étude plus poussée est nécessaire pour comprendre s'il s'agit seulement de l'effet de l'écart-type ou s'il s'agit d'un couplage entre la taille des grains, l'épaisseur du lit de poudre ou encore la rugosité de surface. Comme montré dans la suite, une méthode efficace pour analyser le couplage entre ces paramètres est d'observer pour chaque paramètre étudié, la diffusivité ou la densité de pixels en fonction du rapport épaisseur de lit de poudre / taille de grain $\frac{E}{\mu}$. Lorsque ce rapport est proche de 1, le lit de poudre a une épaisseur d'environ un grain, plus il est grand, plus il y a de grains dans l'épaisseur. $E/\mu = 2$ correspond à une épaisseur de deux tailles moyenne de grain.

Les figures 4.10 et 4.11 montrent une étude de l'influence du rapport E/μ sur la qualité du lit de poudre. Les échantillons de poudres utilisés ici sont mono-disperses

(tous les grains ont la même taille) donc μ représente la taille des grains. Cela permet d'isoler l'effet de ce paramètre et de ne pas prendre en compte l'effet de l'écart-type de la distribution granulométrique. Trois valeurs de rapport E/μ sont testées ($E/\mu = 1, 2, 3$), pour chaque rapport les tailles de grains sont $\mu = 20, 30, 40 \mu\text{m}$ et l'épaisseur est choisie pour avoir un rapport égal à 1, 2 ou 3. Chaque point rouge représente une simulation d'étalement, la courbe bleue représente la moyenne de la diffusivité pour chaque rapport E/μ . La figure 4.10 représente la qualité du lit de poudre au sens de la densité de pixels en fonction du rapport E/μ alors que la figure 4.11 représente la qualité au sens de la diffusivité thermique.

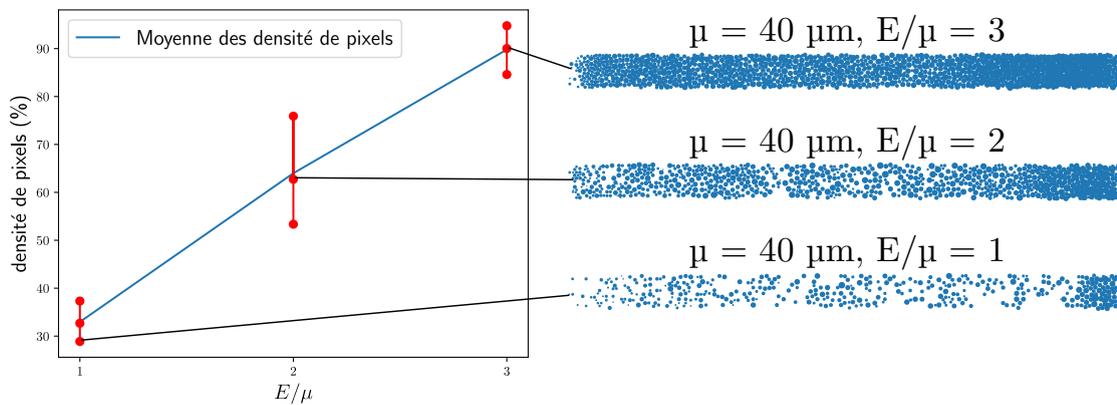


FIGURE 4.10 – Évolution de la densité de pixels en fonction du paramètre réduit E/μ

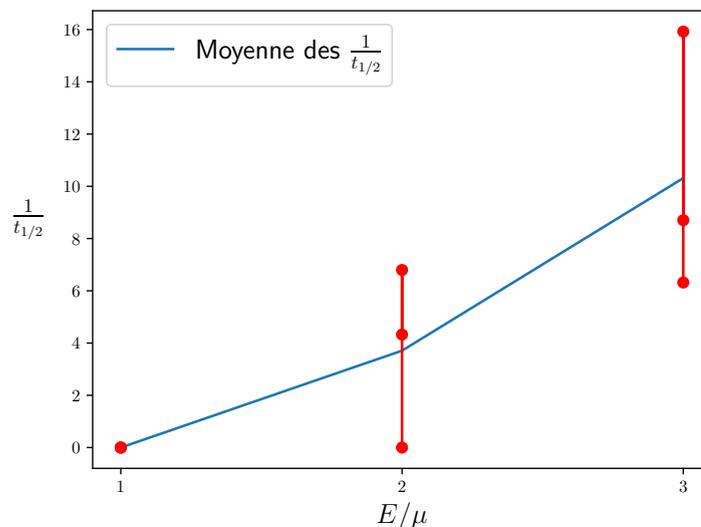


FIGURE 4.11 – Évolution de $\frac{1}{t_{1/2}}$ en fonction du paramètre réduit E/μ

La qualité du lit de poudre s'améliore lorsque le rapport E/μ augmente. Pour chaque point, la qualité évolue avec ce rapport quelques soient les valeurs des paramètres E et μ . Il y a une certaine dispersion pour les grandes valeurs du rapport, par contre la dispersion diminue pour les faibles valeurs qui correspondent aux lits de poudre de mauvaise qualité. Comme l'objectif est de discriminer principalement les mauvais lits de poudre, il est choisi de prendre ce rapport comme paramètre réduit des études suivantes afin de limiter le nombre de paramètres d'étude et de généraliser les résultats.

4.3.2 Rugosité

La surface sur laquelle est réalisé l'étalement ne doit pas être parfaitement lisse car une surface réelle, que ce soit le plateau pour la première couche ou la dernière couche de la pièce en fabrication, a une certaine rugosité qui peut être différente selon la nature du matériau. De plus, sur une surface lisse, les grains glissent et le comportement global de la poudre n'est pas réaliste.

Cette étude permet donc d'observer l'influence de la rugosité de surface sur la qualité de l'étalement. Les échantillons de poudres utilisés ici sont formés de grains dont la distribution granulométrique est mono-disperse, tous les grains ont la même taille. L'objectif étant en même temps d'observer si la taille moyenne de grain a une influence sur la qualité du lit de poudre afin d'essayer d'expliquer le résultat de l'effet de l'écart-type de la distribution granulométrique présenté précédemment.

Trois échantillons de poudre sont utilisés (10, 30, 50 μm), trois rugosité (10, 30, 50 μm), quatre épaisseurs de lit de poudre (30, 60, 90, 120 μm).

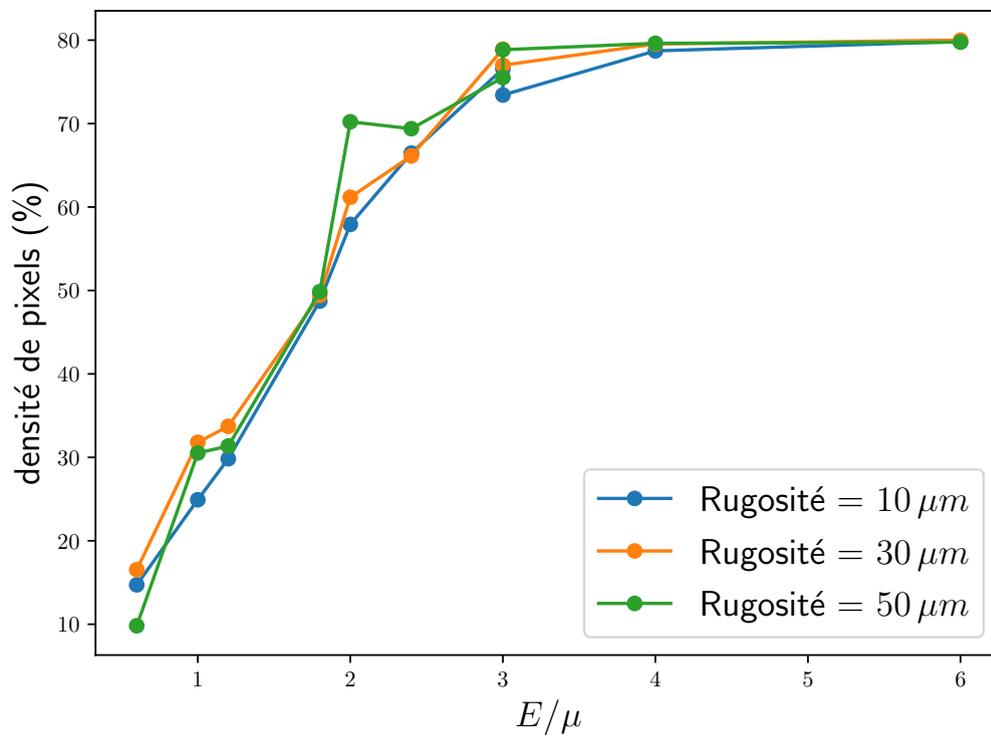


FIGURE 4.12 – Densité de pixels

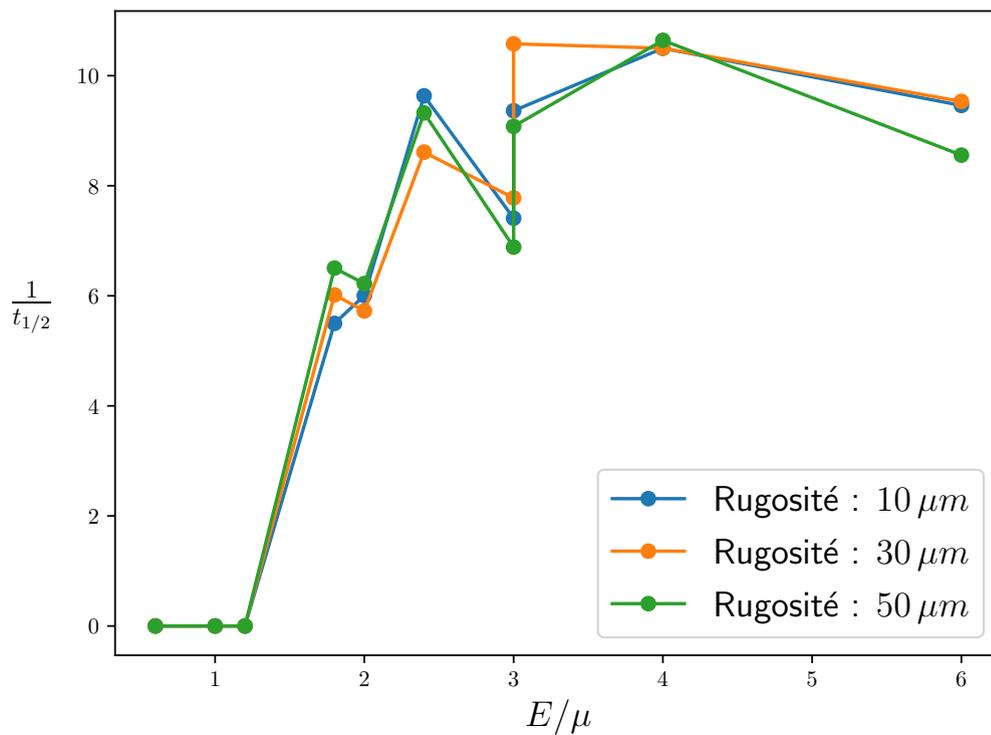


FIGURE 4.13 – Effet de la rugosité

Comme le montre les figures 4.12 et 4.13, il n'y a pas d'effet de la rugosité puisque les courbes sont quasiment confondues. La rugosité n'est donc pas le paramètre responsable d'une qualité de lit de poudre inférieure lorsque l'écart-type de la distribution granulométrique augmente. Peut-être alors qu'une distribution étroite permet effectivement d'obtenir de meilleurs lits de poudre, notamment car l'épaisseur de poudre est très faible par rapport à la taille des grains. L'étude suivante observe l'effet de différentes granulométries.

4.3.3 Granulométrie

Après les résultats observés lors de l'étude de l'influence de l'écart-type de la distribution granulométrique, il est important d'analyser l'effet de la granulométrie sur la qualité du lit de poudre. Dans cette étude, quatre échantillons sont étudiés, chacun suit une loi de distribution normale :

- Taille moyenne $\mu = 20 \mu m$, écart-type $\sigma = 5 \mu m$
- Taille moyenne $\mu = 20 \mu m$, écart-type $\sigma = 15 \mu m$
- Taille moyenne $\mu = 40 \mu m$, écart-type $\sigma = 5 \mu m$
- Taille moyenne $\mu = 40 \mu m$, écart-type $\sigma = 15 \mu m$

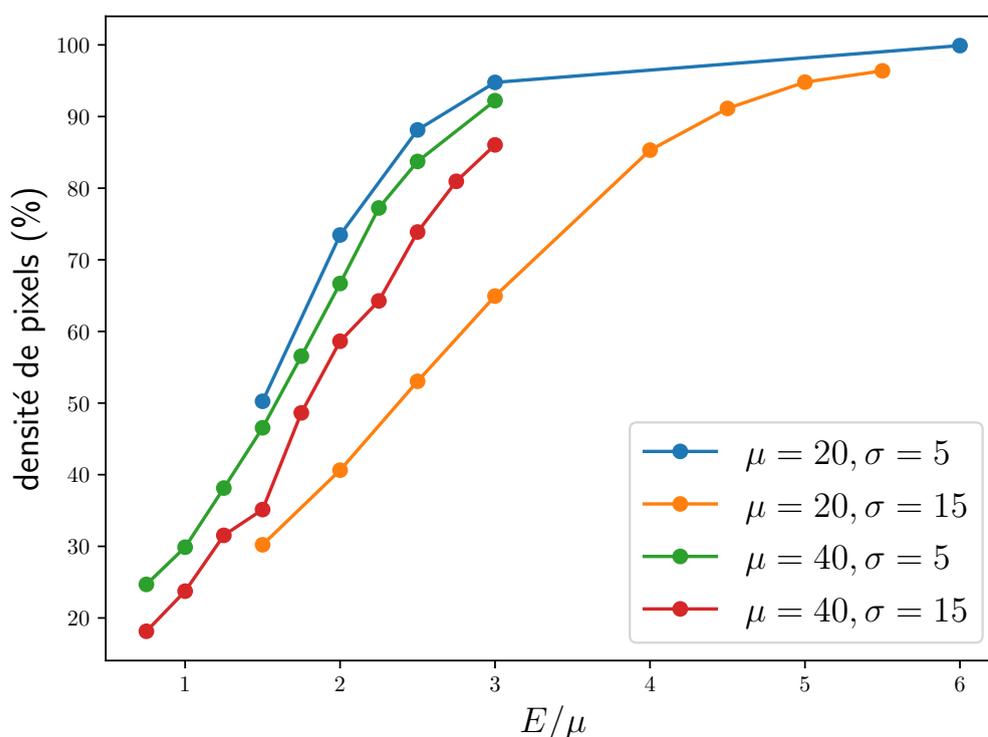


FIGURE 4.14 – Analyse par densité de pixels

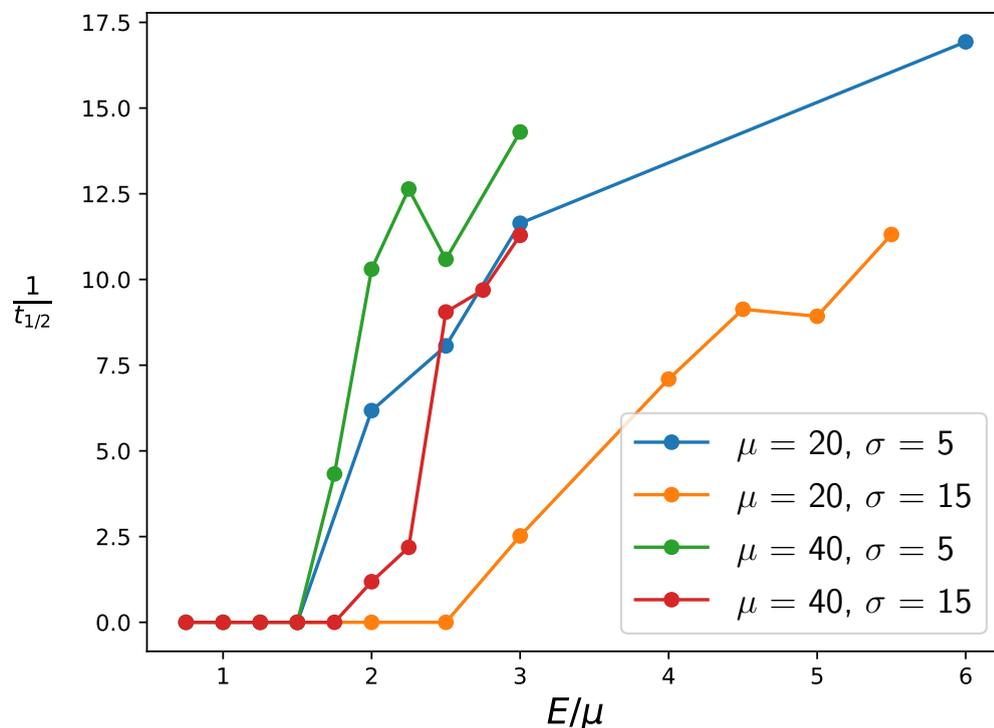


FIGURE 4.15 – Calcul de la diffusivité

Les figures 4.14 et 4.15 montrent respectivement la densité de pixels par analyse d'image et la diffusivité en fonction de différents rapports E/μ pour chacune des granulométries. Comme déjà observé, les échantillons avec un écart-type plus élevé produisent de moins bons lits de poudre. Pour ce qui est de l'effet de la taille moyenne, on voit que la courbe orange ($\mu = 20, \sigma = 15$) est sous la courbe rouge ($\mu = 40, \sigma = 15$) avec les deux méthodes de caractérisation mais l'ordre est différent pour les courbes bleue ($\mu = 20, \sigma = 5$) et verte ($\mu = 40, \sigma = 5$) bien qu'étant proches l'une de l'autre. La courbe orange représente l'échantillon le plus mauvais parmi ceux étudiés, c'est aussi l'échantillon qui présente la plus forte variation en pourcentage de taille (~ 5 à $35 \mu m$ contre ~ 25 à $55 \mu m$ pour la courbe rouge). Cette étude confirme donc que la dispersion de taille a un effet négatif sur la qualité du lit de poudre. Ce résultat qui contredit la littérature pour les volumes 3D est sans doute dû au fait que l'on étale un film très mince de poudre et que l'effet de comblement des vides par les petites particules ne peut apparaître.

L'observation de ces résultats montrent également que lorsque $t_{1/2}$ est infini ($\frac{1}{t_{1/2}} = 0$), cela correspond globalement à une densité de 50 % sur l'analyse d'image de lit de poudre.

4.3.4 Adhésion

L'effet de l'adhésion a déjà été montré dans le chapitre 3 en observant la densité et le nombre de coordination en fonction de la position dans le lit de poudre. L'objectif est ici d'observer l'influence de l'adhésion sur la qualité du lit de poudre pour des valeurs entre 0 et 1 mJ/m^2 qui sont des valeurs plus proches d'une poudre réelle d'après les résultats d'étalement que celles utilisées dans le chapitre 3 où le but était de mettre en évidence l'importance de caractériser ce paramètre.

Les figures 4.16 et 4.17 montrent respectivement la densité de pixels et la diffusivité en fonction des rapports E/μ pour différentes valeurs d'adhésion.

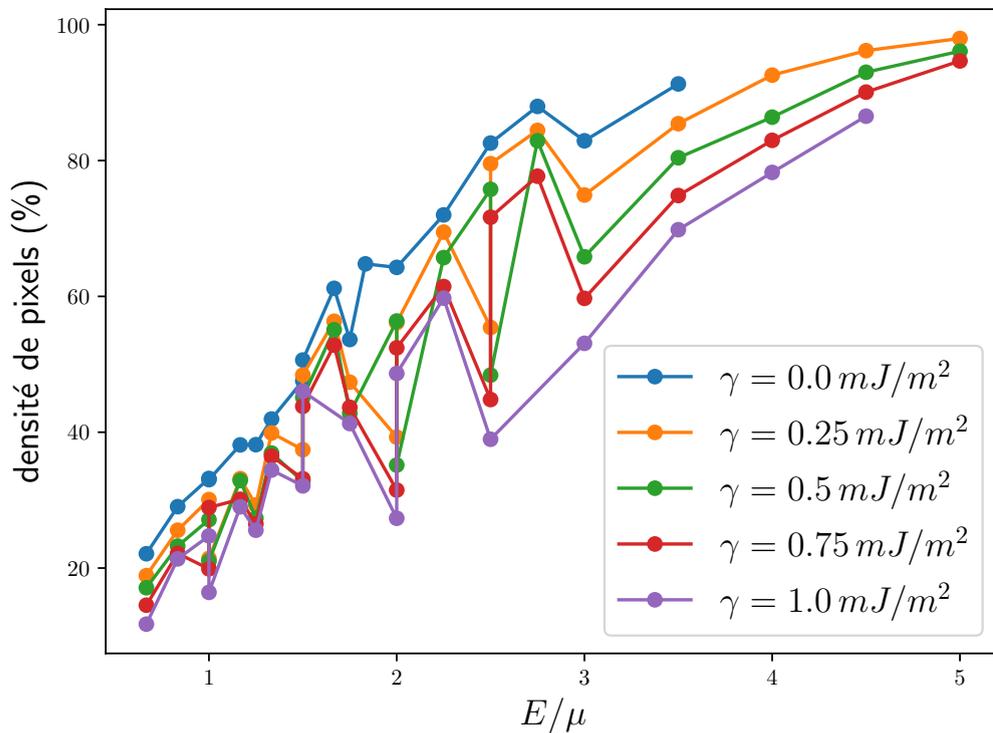


FIGURE 4.16 – Analyse par densité de pixels

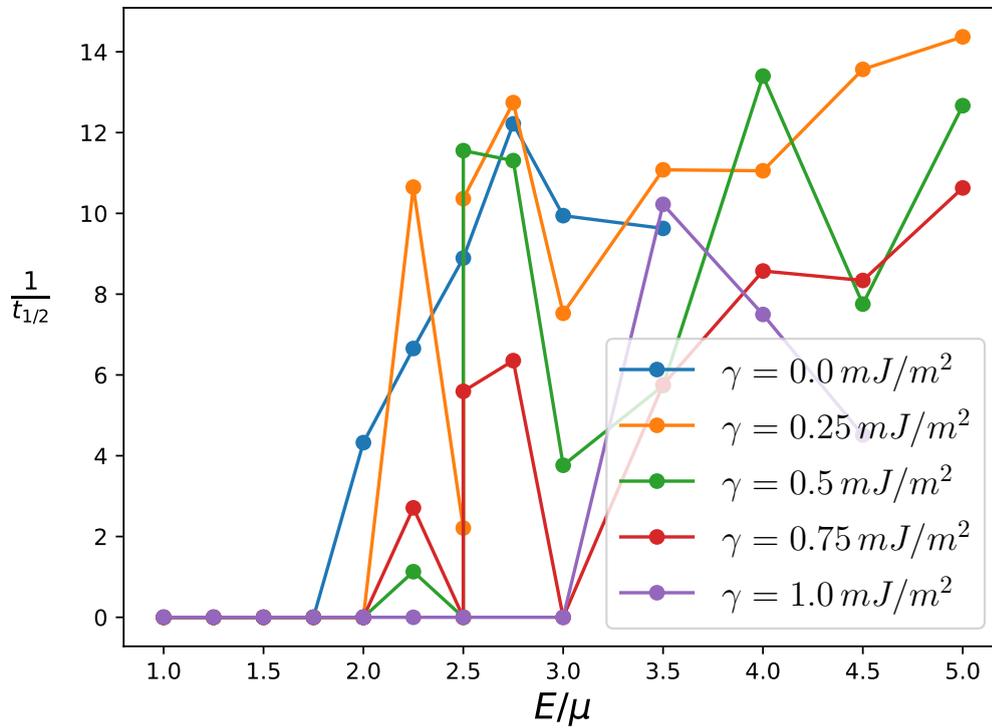


FIGURE 4.17 – Calcul de la diffusivité

Ces résultats sont concordants avec l'analyse du chapitre précédent puisque lorsque l'adhésion est plus faible, le lit de poudre est meilleur pour un rapport E/μ donné. De la même manière, une adhésion plus faible permet d'utiliser un rapport E/μ plus petit pour une qualité équivalente.

4.3.5 Vitesse racleur

De la même manière que pour l'adhésion, la vitesse du racleur est un paramètre qui a déjà été étudié précédemment avec la mesure de la densité et le nombre de coordination. L'objectif ici est de confirmer les résultats avec cette nouvelle méthode de caractérisation de la qualité du lit de poudre.

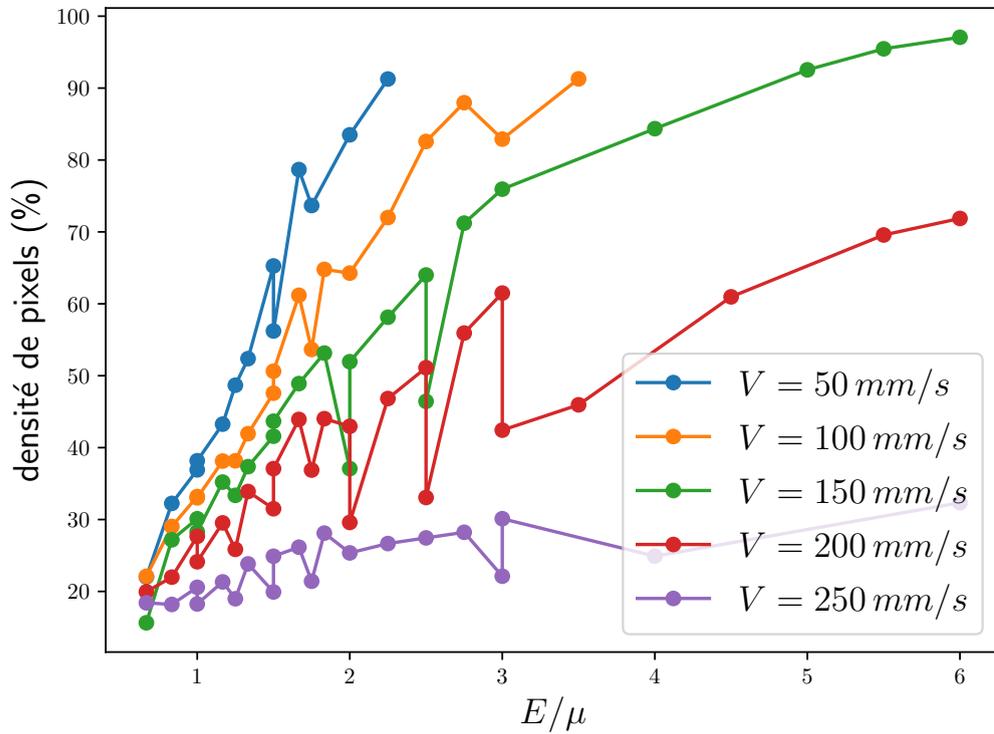


FIGURE 4.18 – Analyse par densité de pixels

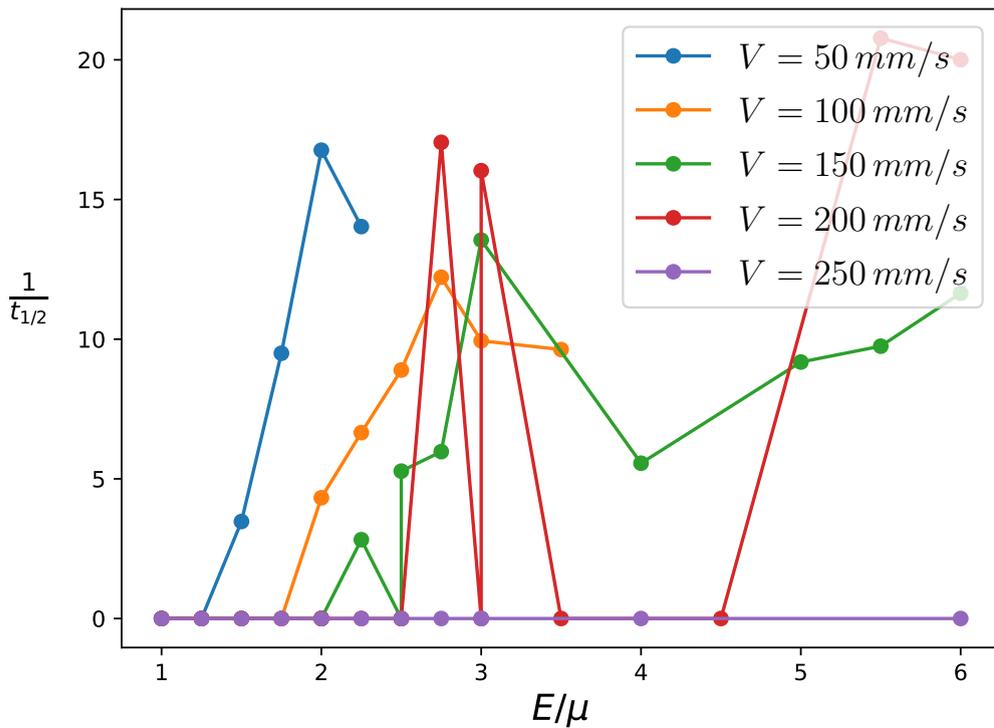


FIGURE 4.19 – Calcul de la diffusivité

Comme attendu, plus la vitesse du racleur est lente, meilleure est la qualité du lit de poudre lorsque le rapport E/μ est grand.

Couplage vitesse/adhésion : Une analyse du couplage entre la vitesse du racleur et l'adhésion de la poudre est également réalisée. A partir des précédentes études, on peut établir un rapport E/μ limite à partir duquel $t_{1/2}$ devient infini. La valeur de E/μ limite de ce premier $t_{1/2}$ infini semble correspondre à 50% de densité de pixels sur l'analyse d'image du lit de poudre. La figure 4.20 montre l'évolution du rapport E/μ limite (lorsque la densité de pixels est inférieure à 50%) en fonction de l'adhésion pour chacune des vitesses de racleur. La figure 4.21 montre l'évolution du rapport E/μ limite par rapport à la diffusivité (lorsque $t_{1/2}$ devient infini). Ainsi, lorsqu'on est au-dessus des courbes, le lit de poudre est de bonne qualité. Inversement, un point sous la courbe donne un lit de poudre de mauvaise qualité.

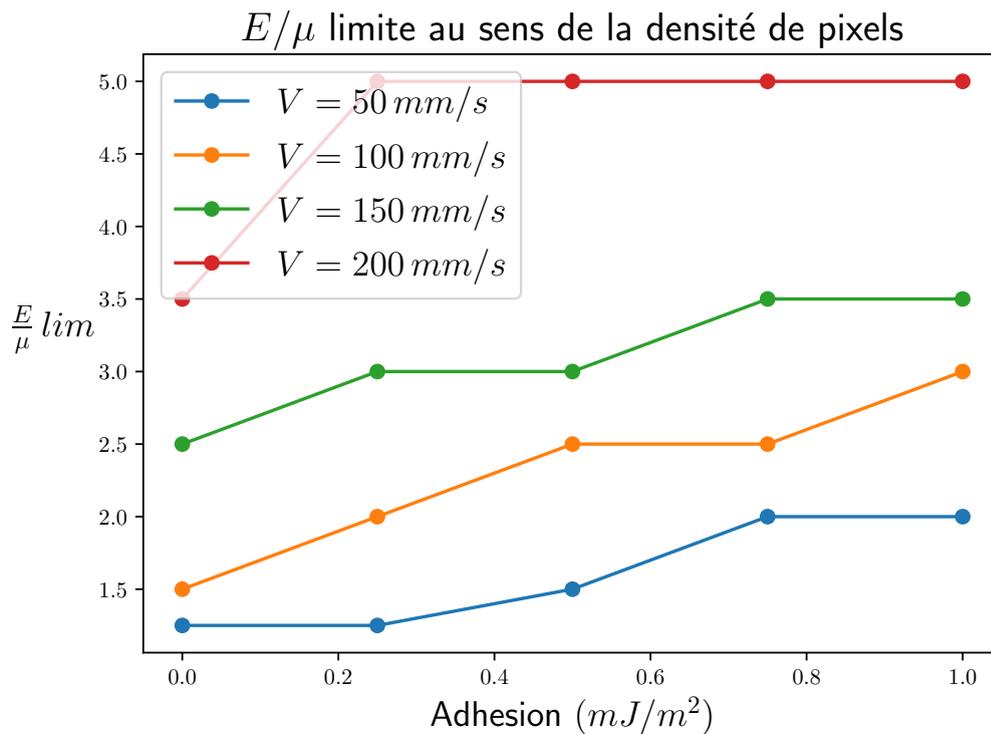
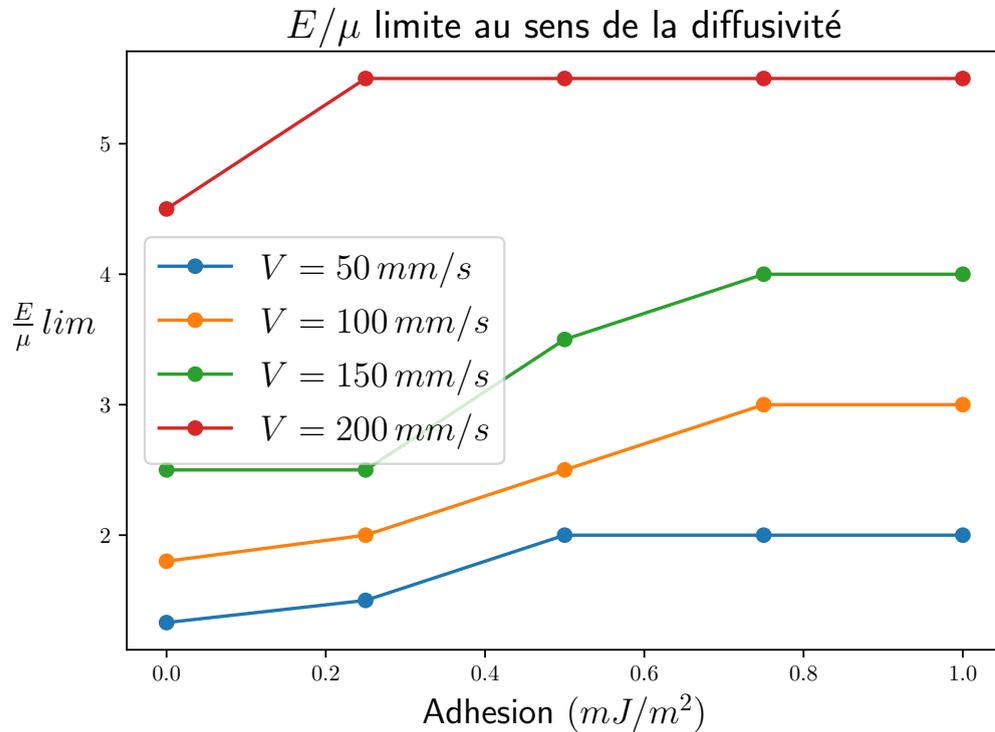


FIGURE 4.20 – E/μ limite lorsque la densité de pixels est inférieure à 50%

FIGURE 4.21 – E/μ limite lorsque $t_{1/2}$ est infini

Ces courbes montrent bien que le rapport E/μ -limite est atteint à des valeurs plus élevées lorsque la vitesse augmente et lorsque l'adhésion augmente conformément aux résultats obtenus avec les analyses précédentes. Avec une vitesse de racleur ou une adhésion plus faible, il est possible d'étaler un lit de poudre de bonne qualité avec un rapport E/μ plus petit. Ces courbes permettent aussi d'avoir un indicateur par rapport à la qualité à attendre de l'étalement.

4.4 Conclusion

Dans un tel procédé, le nombre de paramètres qui entrent en jeu est important. L'influence d'autres paramètres et d'autres couplages de paramètres auraient pu être étudiée. Les études présentées dans ce chapitre montrent l'intérêt de développer des méthodes de caractérisation de la qualité du lit de poudre.

Un paramètre essentiel est le rapport $\frac{E}{\mu}$. Lorsque celui-ci tend vers 1, il faut des conditions opératoires quasi parfaites pour obtenir un bon lit de poudre (faible vitesse, faible adhésion, faible dispersion de taille de particules). Lorsque celui-ci est plus élevé, les conditions opératoires sont moins exigeantes. Ainsi, du point de vue de l'étalement, un lit de poudre plus épais conduit à une meilleure qualité finale. En

revanche, un lit de poudre épais est plus difficile à laser. Il y a donc un compromis à trouver entre la qualité de l'étalement et celle de la phase de fusion laser.

La méthode de calcul de la diffusion thermique dans le lit de poudre pourrait encore être améliorée en mesurant la vraie diffusivité thermique et la conductivité thermique du lit de poudre pour l'appliquer ensuite dans la simulation de l'interaction laser-matière.

Conclusions générales

L'objectif de ce travail était de développer un modèle numérique du procédé d'étalement du lit de poudre afin de comprendre comment chacun des multiples paramètres procédé jouent un rôle sur l'étalement de la poudre.

À l'issue de cette thèse, un outil de simulation numérique de l'étalement de lit de poudre dans le procédé de fabrication additive de fusion laser sur lit de poudre a été développé. Le modèle numérique utilisé prend en compte plusieurs paramètres procédé tels que la granulométrie de la poudre et ses propres paramètres, les paramètres du racleur (géométrie et vitesse), la rugosité de la pièce en fabrication ou encore l'épaisseur de lit de poudre. Il considère également des paramètres matériaux. Outre les paramètres liés à la granulométrie et la densité du matériau, deux paramètres matériaux interviennent directement dans les lois de comportements appliquées lors d'un contact : le coefficient de frottement des grains et l'énergie d'adhésion qui dépend de la nature du matériau et des conditions environnementales. Il s'avère que, parmi les interactions entre les grains, c'est surtout l'adhésion qui joue un rôle primordial dans le comportement de la poudre et la qualité finale du lit de poudre.

Un protocole de caractérisation de l'adhésion des poudres a été mis en place. Si les essais expérimentaux permettant de mesurer la coulabilité des poudres tels que le tambour tournant ou le cône de Hall sont intéressants pour caractériser les poudres, ils ne permettent cependant pas de déterminer la valeur du coefficient d'adhésion du modèle numérique. La cause est principalement l'impossibilité de réaliser une simulation d'une géométrie équivalente. Il aurait été intéressant de pouvoir relier l'indice de cohésion donné par le tambour tournant au modèle numérique. L'essai finalement retenu consiste à mesurer l'angle de talus de l'échantillon de poudre testé et à comparer ce résultat à la simulation numérique équivalente. La méthode de simulation développée dans ce travail utilise une nouvelle approche grâce à des conditions périodiques sur les bords en profitant du côté axisymétrique de la géométrie de l'essai. Cela permet de réduire drastiquement le nombre de particules simulées et d'économiser du temps et des ressources de calcul.

Enfin, plusieurs méthodes de caractérisation de la qualité du lit de poudre ont été développées dont le calcul de la diffusivité thermique du lit de poudre. L'analyse de la qualité du lit de poudre a permis d'étudier l'effet de plusieurs paramètres procédés. D'abord, il a été montré que l'épaisseur de lit de poudre et la taille des grains sont deux paramètres couplés. Un rapport épaisseur lit de poudre / taille de grain grand permet notamment d'utiliser des qualités de poudre moins exigeantes et des vitesses d'étalement plus grandes. C'est un résultat clé dans la recherche de réduction du temps de fabrication puisque l'augmentation de l'épaisseur de couche et de la vitesse du racleur permet d'accélérer la fabrication. Attention cependant à la phase de fusion laser qui n'est pas compatible avec des épaisseurs de couche trop élevées. L'autre résultat marquant concerne la dispersion des tailles de grains au sein d'un échantillon. Dans une couche de faible épaisseur tel que dans un lit de poudre l'homogénéité est meilleure lorsque la dispersion des tailles de grain est faible contrairement à ce qu'il se passe dans un milieu granulaire en trois dimensions. A notre connaissance de la littérature, il n'y a pas d'étude expérimentale caractérisant la densité d'une seule couche de poudre. Ce type d'étude permettrait de confirmer ce résultat original.

Perspectives

Les perspectives de travaux suite à cette thèse peuvent être réparties en plusieurs intervalles de temps.

A court terme, la réalisation d'essais expérimentaux d'angle de talus est primordiale pour valider le protocole mis en place au cours de la thèse et permettre la caractérisation de l'énergie d'adhésion de la poudre dans le modèle numérique. Les essais réalisés durant la thèse (figure 4.22) ont montré que leur réalisation n'était pas évidente pour obtenir des résultats qui puissent être analysés. Il faut réaliser un essai rigoureusement identique à la simulation. Le nombre de paramètres procédé étant très grand, d'autres études pourraient être réalisées. Premièrement, en ce qui concerne la granulométrie de la poudre qui elle-même peut être composée d'un nombre important de paramètres, il serait intéressant d'étudier l'effet des poudres bimodales sur la qualité du lit de poudre par exemple. Avec peu de développements supplémentaires, l'outil développé dans ce travail permettrait d'étudier l'influence de la géométrie du racleur (rouleau, brosse, souple), l'effet de l'étalement sur une zone composé de poudre et de couche fusionnée (figure 4.23) ou encore une étude pour observer ou non le phénomène de ségrégation qui fait que les plus petites particules ont tendance à être déposées en début d'étalement. Ce phénomène n'a pas été observé dans les études réalisés jusqu'à maintenant et la simulation de domaines beaucoup plus longs est nécessaire.

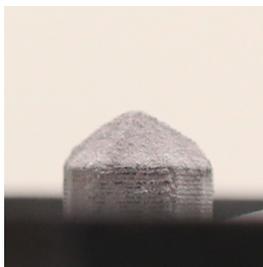


FIGURE 4.22 – Essai angle de talus

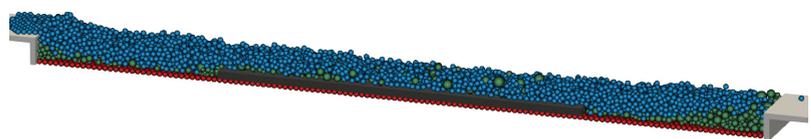


FIGURE 4.23 – Simulation d'un étalement sur une zone de poudre et une zone fusionnée (vidéo)

Des développements numériques supplémentaires pourraient être apportés pour

réduire le coût de calcul en utilisant une méthode de détection de contacts plus adaptée à des échantillons polydispersés avec des paramètres réglés précisément en fonction des propriétés de l'échantillon.

Ensuite, peu de résultats expérimentaux d'étalement sont disponibles dans la littérature. En effet, il est possible de mesurer les propriétés de la pièce finale mais il est plus difficile de réaliser des mesures à l'échelle du grain. A moyen terme, il serait intéressant d'augmenter l'instrumentation du procédé pour pouvoir valider et ajuster le modèle numérique si besoin en comparant des données entre la simulation et la réalité. Par exemple, il est très facile de mesurer la densité d'une couche de poudre numériquement mais cela reste compliqué expérimentalement, il faudrait pouvoir mesurer la différence de masse sur la zone d'étalement avant et après l'étalement. Aussi, un capteur d'effort sur le racleur permettrait de mesurer la force appliquée par la poudre en train d'être étalée sur le racleur.

Au-delà du travail de thèse, puisque les deux autres thèses du projet mené par Safran modélisent le lit de poudre par un milieu continu équivalent pour simuler l'interaction laser-matière, il serait intéressant de développer une simulation d'interaction laser-matière sur un lit de poudre obtenu par simulation numérique. C'est ce qui est déjà étudié dans l'étude de Dal et al [111] qui se sert de la simulation numérique développée dans ce travail de thèse pour générer un lit de poudre utilisé comme donnée d'entrée pour simuler l'action du laser. La figure 4.24 montre la phase du fusion laser d'un lit de poudre simulé. Pour réaliser cette simulation, une fonction mathématique est construite à partir des données du lit de poudre pour approximer la position et la taille des particules afin de résoudre l'interaction laser-matière avec une méthode level-set.

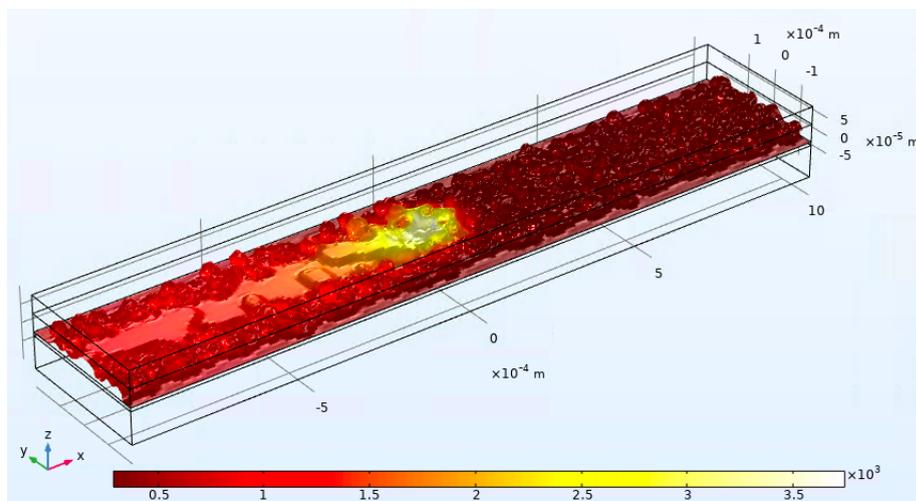


FIGURE 4.24 – Simulation du passage du laser sur un lit de poudre réel [111]

Bibliographie

- [1] J. Andre, A. Le Méhauté, and O. De Witte, “Dispositif pour réaliser un modèle de pièce industrielle,” 1984.
- [2] C. W. Hull, “Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography,” 1984.
- [3] N. Travitzky, A. Bonet, B. Dermeik, T. Fey, I. Filbert-Demut, L. Schlier, T. Schlordt, and P. Greil, “Additive manufacturing of ceramic-based materials,” *Advanced Engineering Materials*, vol. 16, no. 6, pp. 729–754, 2014.
- [4] M. Thomas, C. Davoine, and S. Drawin, “Fabrication additive en aéronautique et en spatial,” *Techniques de l’ingénieur*, 2019.
- [5] NICOLASF, “Optimisation topologique, fabrication additive et architecture.” <http://194.199.196.229/So921/?p=7616>, 2018.
- [6] M. Molitch-Hou, “Boeing 777x takes first flight with over 600 3d-printed parts.” <https://3dprint.com/262742/boeing-777x-takes-first-flight-with-over-600-3d-printed-parts/>, 2020.
- [7] ArianeGroup, “ArianeGroup poursuit les essais à feu d’étid avec la première tête d’injection de chambre de combustion échelle 1 réalisée en impression 3d,” *Communiqué de presse*, 2018.
- [8] E. Musk, “SpaceX dragon 2.” <http://orbiter.dansteph.com/forum/index.php?topic=14268.0>, 2018.
- [9] M. Renard, “Pourquoi la formule 1 se tourne-t-elle vers la fabrication additive?,” *3Dnatives*, 2019.
- [10] M. Renard, “L’impression 3d de régolithe lunaire, un moyen de conquérir la lune?,” *3Dnatives*, 2018.
- [11] S. Haeri, “Optimisation of blade type spreaders for powder bed preparation in additive manufacturing using dem simulations,” *Powder Technology*, vol. 321, pp. 94–104, 2017.

- [12] G. Lefevre, “Le procédé de fabrication additive multi jet fusion (mjf).” <https://www.a3dm-magazine.fr/news/fabrication-additive-polymeres/procedede-fabrication-additive-multi-jet-fusion>, 2019.
- [13] G. Lefevre, “Procédé de fabrication additive clad (construction laser additive directe).” <https://www.a3dm-magazine.fr/news/fabrication-additive-metallique/procedede-fabrication-additive-clad>, 2018.
- [14] F. Gärtner, T. Stoltenhoff, T. Schmidt, and H. Kreye, “The cold spray process and its potential for industrial applications,” *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 15, pp. 223–232, 2006.
- [15] Y. A. Mayi, M. Dal, P. Peyre, M. Bellet, C. Metton, C. Moriconi, and R. Fabbro, “Transient dynamics and stability of keyhole at threshold in laser powder bed fusion regime investigated by finite element modeling,” *Journal of Laser Applications*, vol. 33, 2021.
- [16] W. E. King, H. D. Barth, V. M. Castillo, G. F. Gallegos, J. W. Gibbs, D. E. H. Hahn, C. Kamath, and A. M. Rubenchik, “Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214, pp. 2915–2925, 2014.
- [17] U. Ali, Y. Mahmoodkhani, S. I. Shahabad, E. R., F. Liravi, E. Sheydaeiian, H. K. Y., E. Marzbanrad, M. Vlasea, and E. Toyserkani, “On the measurement of relative powder-bed compaction density in powder-bed additive manufacturing processes,” 2018.
- [18] J. A. Muñoz-Lerma, A. Nommeots-Nomm, K. E. Waters, and M. Brochu, “A comprehensive approach to powder feedstock characterization for powder bed fusion additive manufacturing : a case study on als7mg,” *Materials*, vol. 11, 2018.
- [19] A. International, “Astm d4164, standard test method for mechanically tapped packing density of formed catalyst and catalyst carriers,” 2018.
- [20] A. International, “Astm b527 standard test method for tap density of metal powders and compounds,” 2014.
- [21] A. International, “Astm b213, standard test methods for flow rate of metal powders using the hall flowmeter funnel,” 2020.
- [22] ISO, “Iso 4490, poudres métalliques — détermination du temps d’écoulement au moyen d’un entonnoir calibré (appareil de hall),” 2018.
- [23] A. International, “Astm b964, standard test methods for flow rate of metal powders using the carney funnel,” 2016.

-
- [24] X. Fu, D. Huck, L. Makein, B. Armstrong, U. Willen, and T. Freeman, “Effect of particle shape and size on flow properties of lactose powders,” *Particuology*, vol. 10, pp. 203–208, 2012.
- [25] S. Pillot, “Fusion laser sélective de lit de poudres métalliques,” *Techniques de l’ingénieur*, 2016.
- [26] P. Marmottant, *Atomisation d’un liquide par un courant gazeux*. Institut national polytechnique de Grenoble, 2001.
- [27] V. Gunenthiram, *Compréhension de la formation de porosités en fabrication additive (LBM). Analyse expérimentale de l’interaction laser - lit de poudre - bain liquide*. École Nationale Supérieure d’Arts et Métiers, 2018.
- [28] N. A. Riley, “Projection sphericity,” *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 11, pp. 94–97, 1941.
- [29] A. Pentland, “A method of measuring the angularity of sands,” *MAG. MN. A.L. Acta Eng. Dom. Transaction of the Royal Society of Canada*, vol. 21, pp. 94–97, 1927.
- [30] E. P. Cox, “A method of assigning numerical and percentage values to the degree of roundness of sand grains,” *Journal of Paleontology*, vol. 1, pp. 179–183, 1927.
- [31] F. G. Tickell, *The Examination of Fragmental Rocks*. Stanford University Press, 1931.
- [32] H. Wadell, “Volume, shape, and roundness of rock particles,” *The Journal of Geology*, vol. 40, pp. 443–451, 1932.
- [33] C. K. Wentworth, “A laboratory and field study of cobble abrasion,” *The Journal of Geology*, vol. 27, pp. 507–521, 1919.
- [34] P. H. Kuenen, “Experimental abrasion of pebbles : 2. rolling by current,” *The Journal of Geology*, vol. 64, pp. 336–368, 1956.
- [35] S. J. Blott and K. Pye, “Particle shape : a review and new methods of characterization and classification,” *Sedimentology*, vol. 55, pp. 31–63, 2008.
- [36] K. Saleh and P. Guigon, “Caractérisation et analyse des poudres - propriétés physiques des solides divisés,” *Techniques de l’ingénieur*, 2009.
- [37] Granutools, “Granudrum.” <https://granutools.com/references/application-notes/instruments/granudrum-new-rheometer-for-powder/>.
- [38] Granutools, “Granupack.” <https://www.granutools.com/en/granupack>.
-

- [39] J. H. Tan, W. L. E. Wong, and K. W. Dalgarno, “An overview of powder granulometry on feedstock and part performance in the selective laser melting process,” *Additive Manufacturing*, vol. 18, pp. 228–255, 2017.
- [40] H. Coe and S. Pasebani, “Use of 316l stainless steel powder with bimodal size distribution in selective laser melting,” *Proceedings of the Materials Science and Technology (MS&T) Conference 2018*, 2018.
- [41] H. G. Coe and S. Pasebani, “Use of bimodal particle size distribution in selective laser melting of 316l stainless steel,” *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 4, 2020.
- [42] C. Qiu, C. Panwisawas, M. Ward, H. C. Basoalto, J. W. Brooks, and M. M. Attallah, “On the role of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting,” *Acta Materialia*, vol. 96, pp. 72–79, 2015.
- [43] B. Liu, R. Wildman, C. Tuck, I. Ashcroft, and R. Hague, “Investigation the effect of particle size distribution on processing parameters optimisation in selective laser melting process,” *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, pp. 227–238, 2011.
- [44] G. Yablokova, M. Speirs, J. Van Humbeeck, J. P. Kruth, J. Schrooten, R. Cloots, F. Boschini, G. Lumay, and J. Luyten, “Rheological behavior of β -ti and niti powders produced by atomization for slm production of open porous orthopedic implants,” *Powder Technology*, vol. 283, pp. 199–209, 2015.
- [45] N. Preud’homme, A. Neveu, F. Francqui, E. Opsomer, N. Vandewalle, and G. Lumay, “Simulating powder bed based additive manufacturing processes : From dem calibration to experimental validation,” *14th WCCM-ECCOMAS Congress 2020*, 2020.
- [46] J. Sponer, P. Banas, P. Jurecka, M. Zgarbova, P. Kührova, M. Havrila, M. Krepl, P. Stadbauer, and M. Otyepka, “Molecular dynamics simulations of nucleic acids. from tetranucleotides to the ribosome,” *Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 10, pp. 1771 – 1782, 2014.
- [47] M. Papa, G. F. Giuliani, and A. Bonasera, “Constrained molecular dynamics ii : a n-body approach to nuclear systems,” *Journal of Computational Physics*, vol. 208, pp. 403–415, 2005.
- [48] N. Fillot, I. Iordanoff, and Y. Berthier, “Modelling third body flows with a discrete element method—a tool for understanding wear with adhesive particles,” *Tribology International*, vol. 40, pp. 973–981, 2007.

-
- [49] R. Kobylka, M. Molenda, and J. Horabik, “Dem simulation of the pressure distribution and flow pattern in a model grain silo with an annular segment attached to the wall,” *Biosystems engineering*, vol. 193, pp. 75–89, 2020.
- [50] V. Acary and M. Jean, “Numerical modeling of three dimensional divided structures by the non smooth contact dynamics method : Application to masonry structures,” *The Fifth international Conference on Computational Structures Technology 2000*, pp. 211–221, 2000.
- [51] M. Renouf, F. Dubois, and P. Alart, “Numerical investigations of fault propagation and forced-fold using a non smooth discrete element method,” *European Journal of Computational Mechanics*, vol. 15, pp. 549–570, 2006.
- [52] A. Rafiee, *Contribution à l’étude de la stabilité des massifs rocheux fracturés : caractérisation de la fracturation in situ, géostatistique et mécanique des milieux discrets*. PhD thesis, Université Montpellier II, 2008.
- [53] M. P. Allen, “Introduction to molecular dynamics simulation,” *Computational Soft Matter : From Synthetic Polymers to Proteins, John von Neumann Institute for Computing Jülich, NIC Series*, vol. 23, pp. 1–28, 2004.
- [54] P. Cundall and O. Strack, “A discrete numerical model for granular assemblies,” *Géotechnique*, vol. 29, pp. 47–65, 1979.
- [55] L. Maheo, F. Dau, D. André, J. L. Charles, and I. Iordanoff, “A promising way to model cracks in composite using discrete element method,” *Composites Part B : Engineering*, vol. 71, pp. 193–202, 2015.
- [56] D. André, J. Girardot, and C. Hubert, “A novel dem approach for modeling brittle elastic media based on distinct lattice spring model,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 350, pp. 100–122, 2019.
- [57] H. Chen, Q. Wei, S. Wen, Z. Li, and Y. Shi, “Flow behavior of powder particles in layering process of selective laser melting : Numerical modeling and experimental verification based on discrete element method,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 123, pp. 146–159, 2017.
- [58] C. Meier, R. Weissbach, J. Weinberg, W. A. Wall, and J. Hart, “Critical influences of particle size and adhesion on the powder layer uniformity in metal additive manufacturing,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 266, pp. 484–501, 2019.
- [59] J. J. Moreau and P. D. Panagiotopoulos, *Non-smooth mechanics and applications*. Springer-Verlag Wien, 1988.
- [60] M. Jean, “The non-smooth contact dynamics method,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 177, pp. 235–257, 1999.
-

- [61] R. A. Gingold and J. J. Monaghan, “Smoothed particle hydrodynamics : theory and application to non-spherical stars,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 181, pp. 375–389, 1977.
- [62] L. B. Lucy, “A numerical approach to the testing of the fission hypothesis,” *Astronomical journal*, vol. 82, pp. 1013–1024, 1977.
- [63] Z. Y. Yin, Z. Jin, P. Kotronis, and Z. X. Wu, “Novel sph simsand–based approach for modeling of granular collapse,” *International Journal of Geomechanics*, vol. 18, 2018.
- [64] P. Y. Lagrée, L. Staron, and S. Popinet, “The granular column collapse as a continuum : validity of a two-dimensional navier-stokes model with a $\mu(i)$ -rheology,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 686, pp. 378–408, 2011.
- [65] R. S., *Numerical methods for the simulation of continuum granular flow models*. PhD thesis, Université de recherche Paris Sciences et Lettres, 2017.
- [66] E. Parteli and T. Pöschel, “Particle-based simulation of powder application in additive manufacturing,” *Powder Technology*, vol. 288, pp. 96–102, 2016.
- [67] W. Nan, M. Pasha, T. Bonakdar, A. Lopez, U. Zafar, S. Nadimi, and M. Ghadiri, “Jamming during particle spreading in additive manufacturing,” *Powder Technology*, vol. 338, pp. 253–262, 2018.
- [68] S. Hoeges, A. Zwiren, and C. Schade, “Additive manufacturing using water atomized steel powders,” *Metal Powder Report*, vol. 72, pp. 111–117, 2017.
- [69] Y. Li, A. Dove, J. Curtis, and J. Colwell, “3d dem simulations and experiments exploring low-velocity projectile impacts into a granular bed,” *Powder Technology*, vol. 288, pp. 303–314, 2016.
- [70] H. R. Hertz, “Ueber die beruehrung elastischer koerper (on contact between elastic bodies),” *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, vol. 92, pp. 156–171, 1882.
- [71] K. Johnson, K. Kendall, and A. Roberts, “Surface energy and the contact of elastic solids,” *Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 324, pp. 301–313, 1971.
- [72] B. V. Derjaguin, V. M. Muller, and Y. P. Toporov, “Effect of contact deformations on the adhesion of particles,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 53, no. 2, pp. 314–326, 1975.
- [73] C. Meier, R. Weissbach, J. Weinberg, W. A. Wall, and J. Hart, “Modeling and characterization of cohesion in fine metal powders with a focus on additive manufacturing process simulations,” *Powder Technology*, vol. 343, pp. 855–866, 2019.

-
- [74] S. T. Nase, W. L. Vargas, A. A. Abatan, and J. J. McCarthy, “Discrete characterization tools for cohesive granular material,” *Powder Technology*, vol. 116, pp. 214–223, 2001.
- [75] H. Chen, Q. Wei, Y. Zhang, F. Chen, Y. Shi, and W. Yan, “Powder-spreading mechanisms in powder-bed-based additive manufacturing : Experiments and computational modelling,” *Acta Materiala*, vol. 179, pp. 158–171, 2019.
- [76] J. Zielinski, S. Vervoort, H. W. Mindt, and M. Megahed, “Influence of powder bed characteristics on material quality in additive manufacturing,” *Berg Huettenmaenn Monatsh*, vol. 162, pp. 192–198, 2017.
- [77] M. Fouda, Y. and A. E. Bayly, “A dem study of powder spreading in additive layer manufacturing,” *Granular Matter*, vol. 22, pp. 1–18, 2020.
- [78] J. Steuben, A. Iliopoulos, and J. Michopoulos, “Discrete element modeling of particle-based additive manufacturing processes,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 305, pp. 537–561, 2016.
- [79] A. Gobal and B. Ravani, “An adaptive discrete element method for physical modeling of the selective laser sintering process,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 869, pp. 69–84, 2017.
- [80] D. André, J. L. Charles, I. Iordanoff, and J. Néauport, “Modélisation par éléments discrets des phases d’ébauchage et de doucissage de la silice,” *Advances in Engineering Software*, vol. 74, pp. 40–48, 2014.
- [81] D. André, *Modélisation par éléments discrets des phases d’ébauchage et de doucissage de la silice*. PhD thesis, Université de Bordeaux, 2012.
- [82] M. Markl and C. Körner, “Powder layer deposition algorithm for additive manufacturing simulations,” *Powder Technology*, vol. 330, pp. 125–136, 2018.
- [83] J. J. Herrmann, R. Mahmoodi Baram, and M. Wackenhut, “Polydisperse packings,” *Brazilian Journal of Physics*, vol. 33, pp. 591–593, 2003.
- [84] A. J. Yule and J. J. Dunkley, *Atomization of Melts*. Oxford Series on Advanced Manufacturing, 1994.
- [85] G. Strano, L. Hao, R. M. Everson, and K. E. Evans, “Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, pp. 589–597, 2013.
- [86] F. Calignano, “Investigation of the accuracy and roughness in the laser powder bed fusion process,” *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 13, pp. 97–104, 2018.

- [87] S. A. Anagnostopoulos, "Pounding of building in series during earthquakes," *Earthquake engineering and structural dynamics*, vol. 16, pp. 443–456, 1988.
- [88] Y. Tsuji, T. Tanaka, and T. Ishida, "Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe," *Powder Technology*, vol. 71, pp. 239–250, 1992.
- [89] A. Gladkyy and R. Schwarze, "Comparison of different capillary bridge models for application in the discrete element method," *Granular Matter*, vol. 16, pp. 911–920, 2014.
- [90] I. Iordanoff, B. Seve, and Y. Berthier, "Solid third body analysis using a discrete approach : Influence of adhesion and particle size on macroscopic properties," *Journal of Tribology*, vol. 124, pp. 530–538, 2002.
- [91] V. Richefeu, M. El Youssoufi, R. Peyroux, and F. Radjaï, "A model of capillary cohesion for numerical simulations of 3d polydisperse granular media," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 32, pp. 1365–1383, 2008.
- [92] L. Verlet, "Computer "experiments" on classical fluids. i. thermodynamical properties of lennard-jones molecules," *Physical Review*, vol. 159, pp. 98–103, 1967.
- [93] W. C. Swope and H. C. Andersen, "A computer simulation method for the calculation of equilibrium constants for the formation of physical clusters of molecules : Application to small water clusters," *Journal of Chemical Physics*, vol. 76, pp. 637–649, 1982.
- [94] A. Coutsias and L. Romero, "The quaternions with an application to rigid body dynamics," *Technical Report, University of New Mexico, Albuquerque*, 1999.
- [95] C. O'Sullivan and J. D. Bray, "Selecting a suitable time step for discrete element simulations that use the central difference time integration scheme," *Engineering Computations*, vol. 21, pp. 278–303, 2003.
- [96] I. C. Group, *Particle Flow Code in Two Dimensions*. Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, Minnesota, MN, 1998.
- [97] I. Terreros, *Modélisation DEM thermo-mécanique d'un milieu continu : Vers la simulation du procédé FSW*. PhD thesis, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2013.
- [98] V. Ogarko and S. Luding, "A fast multilevel algorithm for contact detection of arbitrarily polydisperse objects," *Computer physics communications*, vol. 183, pp. 931–936, 2012.

-
- [99] D. Krijgsman, V. Ogarko, and S. Luding, “Optimal parameters for a hierarchical grid data structure for contact detection in arbitrarily polydisperse particle systems,” *Computational Particle Mechanics*, vol. 1, pp. 357–372, 2014.
- [100] Q. B. Nguyen, M. L. S. Nai, Z. Zhu, C. N. Sun, J. Wei, and W. Zhou, “Characteristics of inconel powders for powder-bed additive manufacturing,” *Engineering*, vol. 3, pp. 695–700, 2017.
- [101] P. Poiron, N. Sommier, A. M. Faugère, and P. Evesque, “Dynamics of size segregation and mixing of granular materials in a 3d-blender by nmr imaging investigation,” *Powder Technology*, vol. 141, pp. 55–68, 2004.
- [102] R. Giraud, K. Marchais, and D. Cornu, “État de l’art et évaluation des forces de cohésion dans les poudres métalliques pour la fabrication additive,” in *SF2M Poudres*, Poudres2019, 2019.
- [103] N. B. Vargaftik, B. N. Volkov, and L. D. Voljak, “International tables of the surface tension of water,” *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, vol. 12, pp. 817–820, 1983.
- [104] N. Taberlet, P. Richard, and E. J. Hinch, “The s shape of a granular pile in a rotating drum,” *Physical Review E*, vol. 73, p. 050301, 2006.
- [105] W. J. Parker, W. J. Jenkins, C. P. Butler, and G. L. Abbott, “Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity,” *Journal of Applied Physics*, vol. 32, pp. 1679–1684, 1961.
- [106] S. A. Ramirez, E. Marin, A. G. Juarez, A. Calderon, C. Calderon, and R. I. Tsonchev, “A hot-wire method based thermal conductivity measurement apparatus for teaching purposes a hot-wire method based thermal conductivity measurement apparatus for teaching purposes,” *European Journal of Physics*, vol. 33, pp. 897–906, 2012.
- [107] I. Yang, D. Kim, and S. Lee, “Construction and preliminary testing of a guarded hot plate apparatus for thermal conductivity measurements at high temperatures,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 122, pp. 1343–1352, 2018.
- [108] B. Hay, J. R. Filtz, and J. C. Batsale, “Mesure de la diffusivité thermique par la méthode flash,” *Techniques de l’Ingénieur*, 2004.
- [109] H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, *Conduction of heat in solids*. Oxford Science Publications, 1959.
- [110] I. Terreros, I. Iordanoff, J. C. Charles, D. Coupard, and S. Tcherniaieff, “Discrete element method, a tool to investigate complex thermo mechanical be-

- haviour : Application to friction stir welding,” *2009 International Journal of Material Forming*, vol. 2, pp. 573–576, 2009.
- [111] M. Dal, Y. Mayi, K. Marchais, and P. Peyre, “Powder consideration for additive manufacturing simulation,” *COMSOL Conference 2020*, 2020.

Annexe A

Essais expérimentaux d'angle de talus

A.1 Essais avec Inconel

La simulation de l'étalement de poudre pour le procédé LBM nécessite la connaissance du paramètre d'adhésion des poudres. Pour cela, l'objectif est d'utiliser l'essai de l'angle de talus pour comparer la simulation et l'expérience et retrouver une valeur d'adhésion pour un échantillon de poudre donné. L'essai de l'angle de talus considéré ici consiste à remplir de la poudre dans un cylindre d'un diamètre donné puis de lever le cylindre pour laisser s'écouler la poudre et former un tas sur le support de diamètre égal à celui du cylindre. Deux cylindres de 1 cm et 5 cm (figure A.1) de diamètre sont réalisés pour faire ces essais. Le cylindre de 1 cm permettra de comparer les résultats entre la simulation et l'expérience. Le cylindre de 5 cm ne peut pas être simulé car la quantité de poudre importante demande un coût de calcul trop important, cependant il est plus facile de manipuler celui-ci. Dans le cas où les résultats d'angle de talus seraient équivalents entre les deux cylindres, il serait alors possible de comparer la simulation d'un petit cylindre avec l'expérience réalisée sur un plus gros cylindre. Trois supports de 1 cm, 5 cm et 10 cm de diamètre sont réalisés. Les supports de 1 cm et 5 cm (figure A.2) correspondent avec les cylindres de mêmes diamètres. Le support de 10 cm permettra d'observer si la taille du support a une influence sur le résultat.



FIGURE A.1 – Cylindre de \varnothing 5 cm (à gauche) et 1 cm (à droite)



FIGURE A.2 – Cylindre sur support ($\varnothing = 5$ cm)

Les essais présentés ici ont pour but de vérifier leur faisabilité avec les géométries utilisées ainsi que d'observer le comportement de la poudre avec ces manipulations. Cela permettra de préparer une prochaine campagne d'essais complète.

Trois échantillons de Rene77 (masse volumique = 7.8 g/cm^3) ont été étudiés, leur distribution granulométrique est présentée sur la figure A.3 :

- 10-53 μm
- 20-38 μm
- 53-106 μm

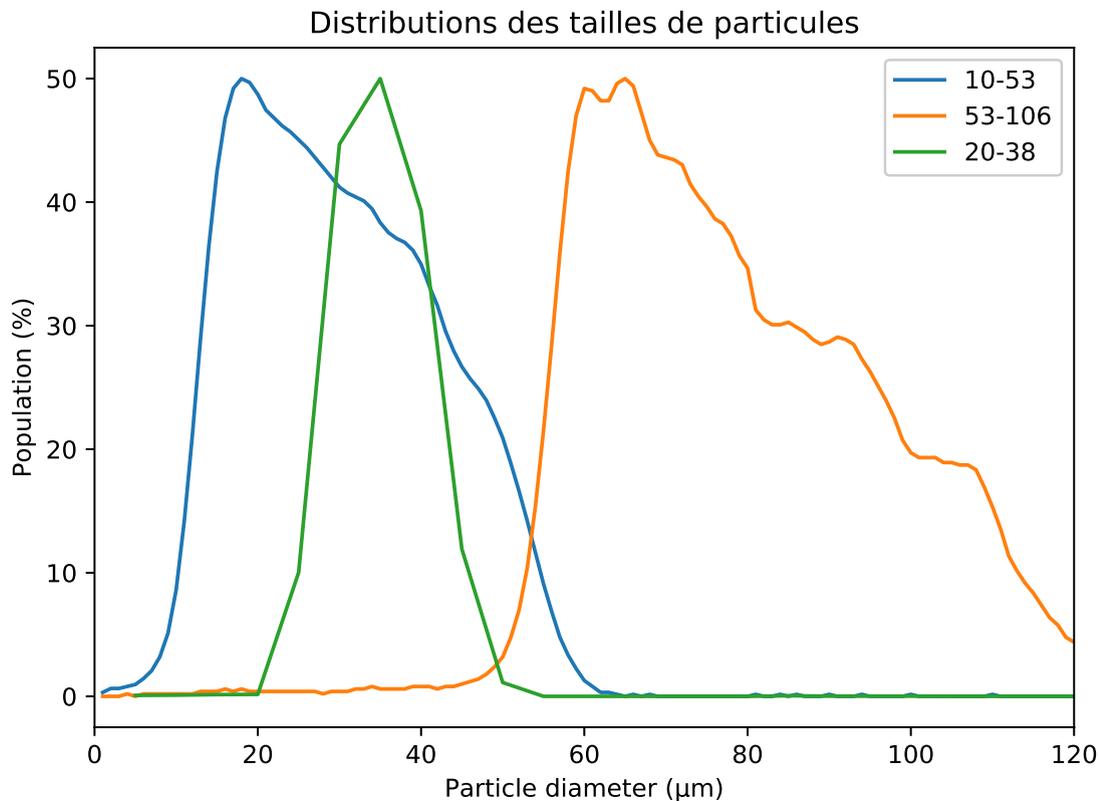


FIGURE A.3 – Distribution des tailles de particules des échantillons étudiés

Le cylindre, posé sur son support, est rempli de poudre par le haut, puis il est soulevé pour laisse la poudre s'écouler. Dû aux conditions d'usinage, les supports de 1 et 5 cm présentent un coté avec un état de surface irrégulier, l'autre face présente une surface plutôt rugueuse mais plus régulière qui correspond au bout de la barre dont le support est issu. Il est alors préféré de faire les essais sur la surface rugueuse.

La mesure de l'angle de talus est réalisée après que l'écoulement s'arrête en mesurant la hauteur du tas de poudre A.4. Puisque le diamètre du support est connu, l'angle de talus peut facilement être déterminé. Soit h la hauteur du tas de poudre et D le diamètre du support, l'angle de talus est obtenu par la formule $\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{2h}{D} \right)$



FIGURE A.4 – Mesure de l'angle

Essais avec cylindre de 5 cm

Essai 1 : Le premier essai est réalisé avec 350 g de poudre de l'échantillon de 10-53 μm . Il y a trop de poudre (Figure A.5). La hauteur du tas mesurée est de 34,97 mm soit un angle de talus de 54.4°.

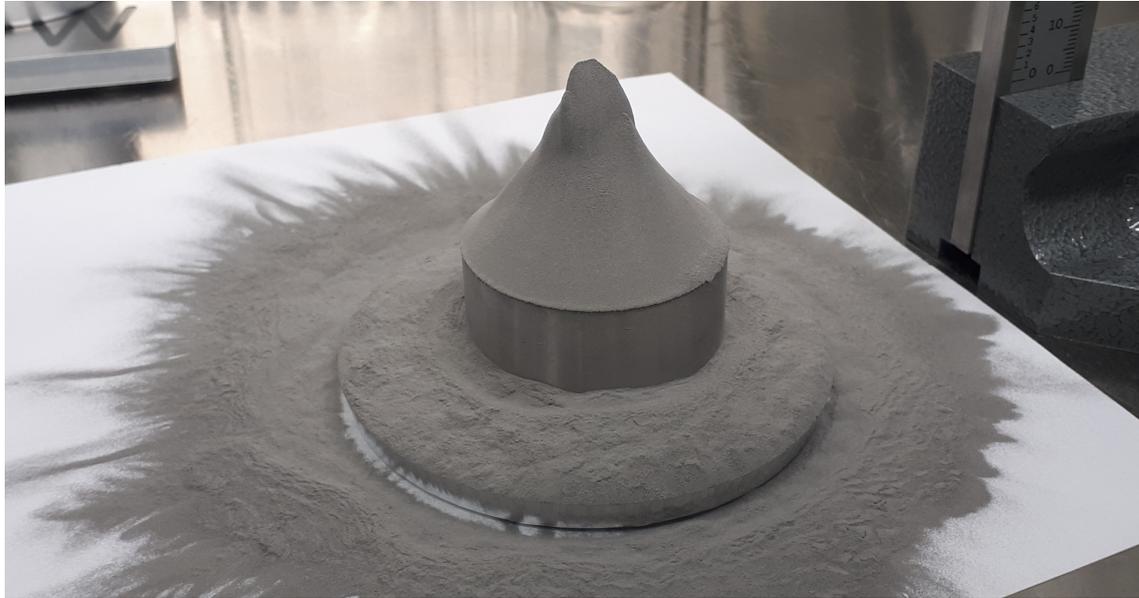


FIGURE A.5 – Angle de talus pour un échantillon de Rene77 (10-53 μm)

Essai 2 : Le deuxième essai est réalisé avec 200g du même échantillon de poudre. Cette fois, la hauteur mesurée est de 24,49 mm, ce qui donne un angle de 45.6°. Le résultat est très différent, est-ce la différence de quantité de poudre ou la manipulation à la main qui en est la cause ?

Essai 3 : Le troisième essai est réalisé avec 200g de l'échantillon 53-106 μm . La hauteur mesurée est de 17,39 mm, l'angle est de 34.8°.

Essais avec cônes

Cône de Carney : Le cône de Carney permet de tester la coulabilité d'une poudre avec un diamètre d'orifice de 5 cm. Cet appareil est utilisé dans cet essai pour reproduire un tas de poudre suite à l'écoulement de celle-ci à travers le cône (Figure A.6). Il s'agit de l'échantillon 53-106 μm qui est testé. La coulabilité élevée de cet échantillon, donc la vitesse élevée d'écoulement, creuse le tas de poudre (Figure A.7).

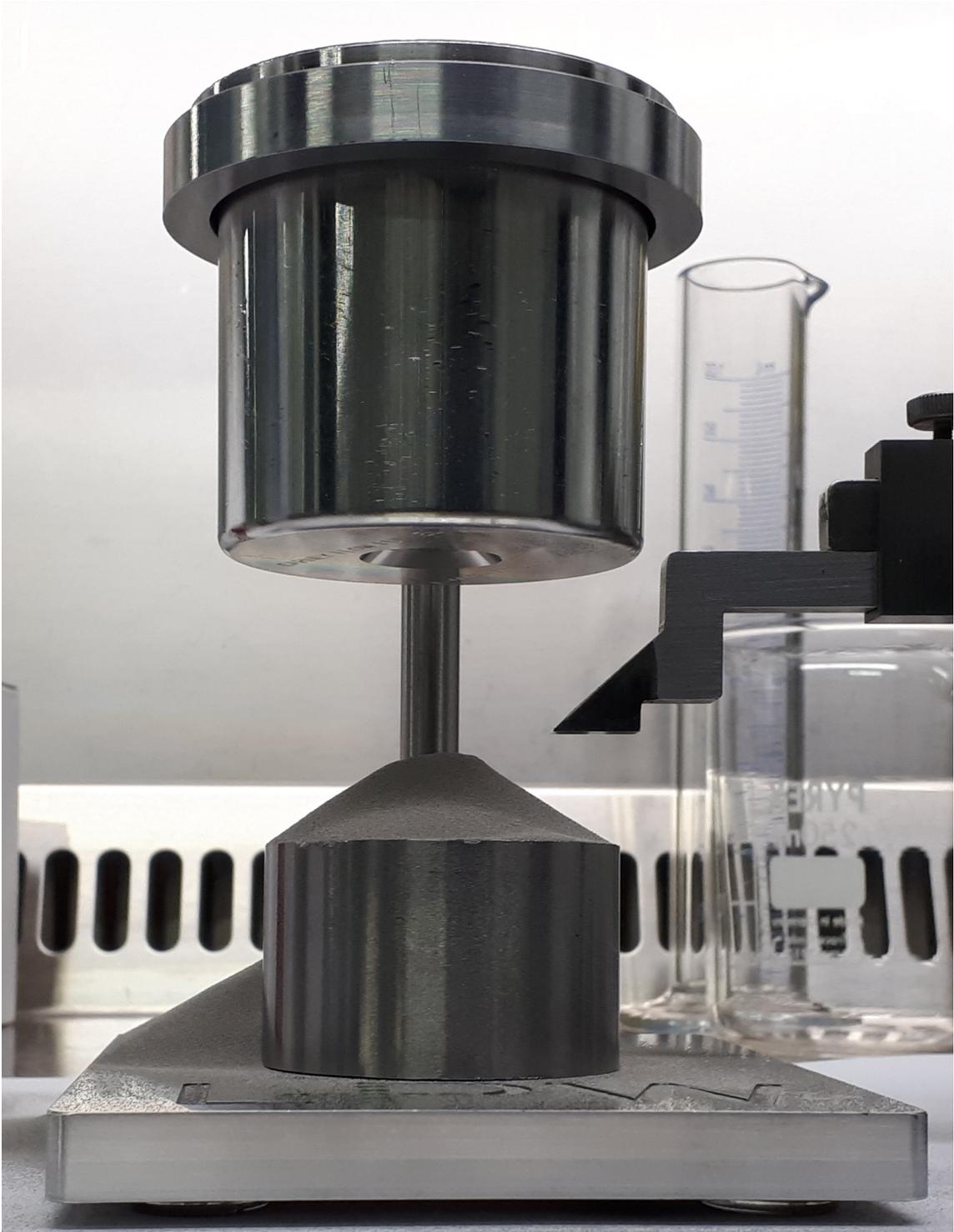


FIGURE A.6 – Angle de talus obtenu avec le cône de Carney

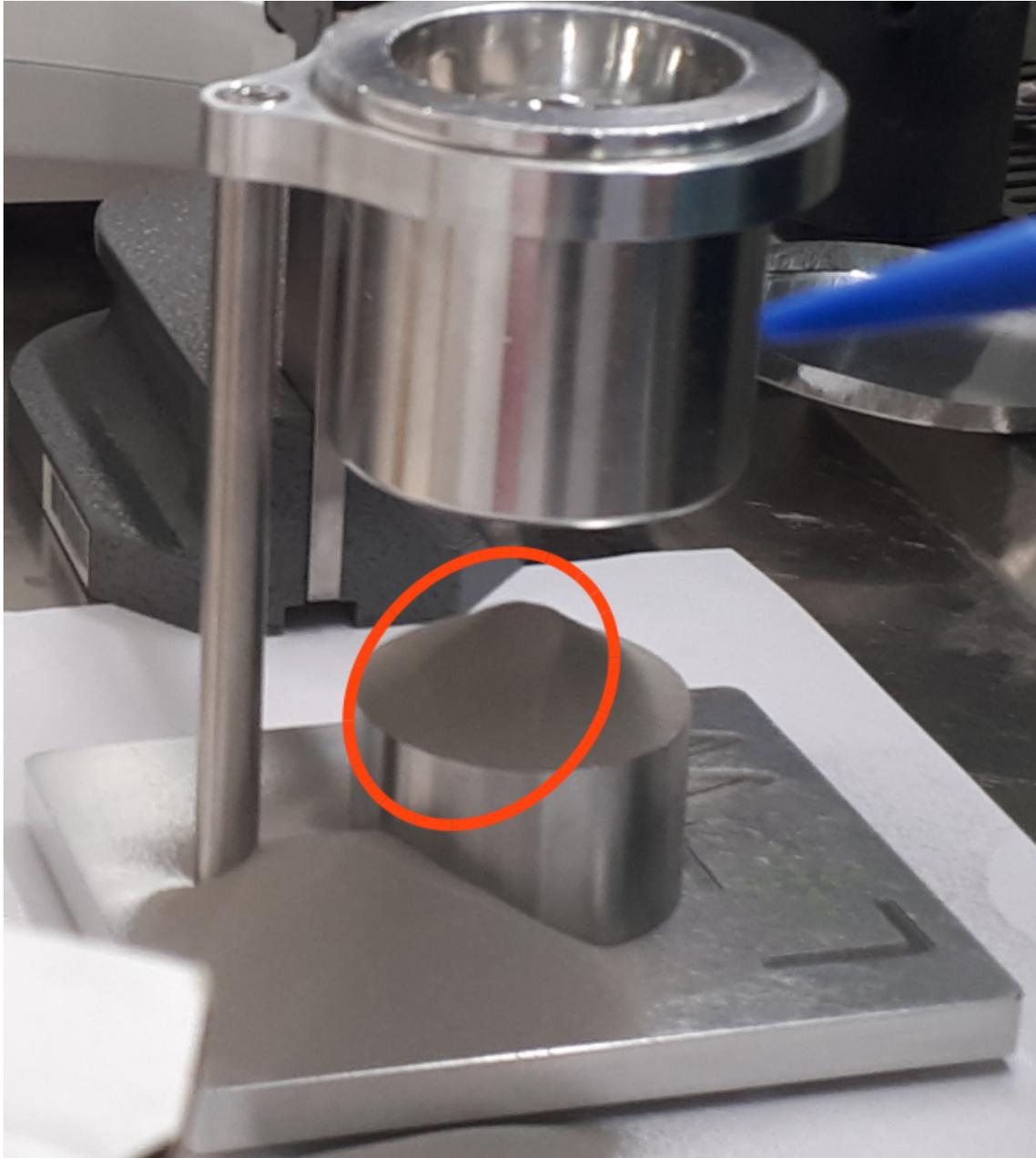


FIGURE A.7 – Effet de la vitesse d'écoulement

Cône de Hall : Le même essai est réalisé avec le cône de Hall dont le diamètre de l'orifice est de 2.5 cm (Figure A.8). La vitesse d'écoulement est moins importante donc le tas de poudre est moins creusé (Figure A.9).

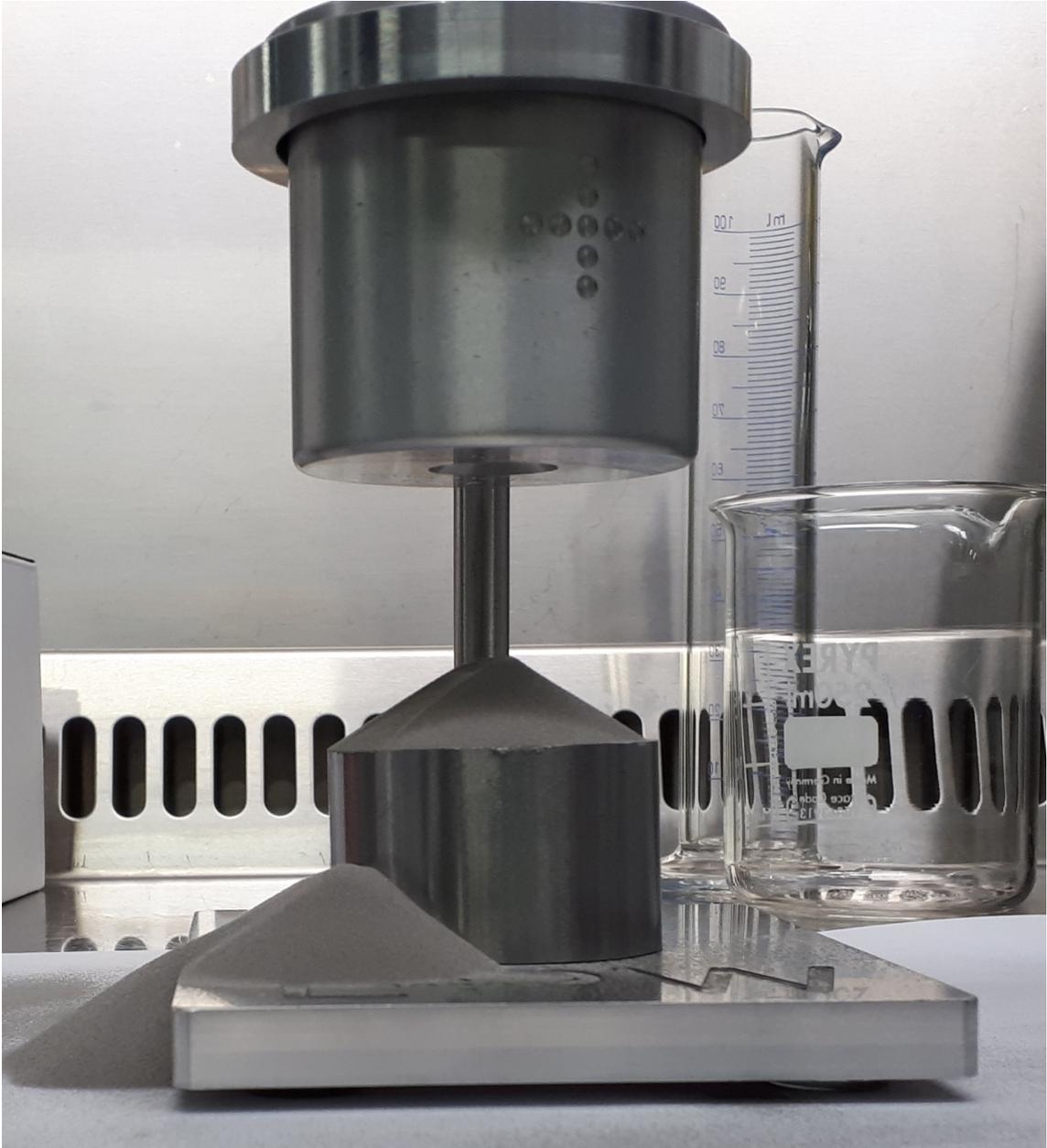


FIGURE A.8 – Angle de talus obtenu avec le cône de Hall



FIGURE A.9 – Effet de la vitesse d'écoulement

Essais avec cylindre de 1 cm Les essais suivants sont réalisés avec le petit cylindre qui est rempli jusqu'au bord. La figure A.10 montre la manipulation du

cylindre à la main.



FIGURE A.10 – Manipulation

Essai 6 : Le sixième essai est réalisé avec le cylindre de 1 cm de diamètre et l'échantillon 53-106 μm (Figure A.11). La hauteur mesurée est de 3.28 mm soit un angle de talus de 33.3°.



FIGURE A.11 – Angle de talus

Essai 7 : Le septième essai est réalisé avec l'échantillon 10-53 μm . La hauteur mesurée est de 6.09 mm soit un angle de talus de 50.6°.

Essai 8 : Le huitième essai est réalisé avec l'échantillon 20-38 μm . La hauteur mesurée est de 6.2 mm soit un angle de talus de 52.1°.

Essais avec plateau de 10 cm Les essais suivants sont réalisés avec le plateau de 10 cm de diamètre et le cylindre de 1 cm de diamètre. La plateau étant grand par rapport au cylindre et à la quantité de poudre utilisée, le tas de poudre n'atteint pas les bords. Ainsi pour calculer l'angle de talus, il faut mesurer la hauteur du talus et le diamètre de la base du tas.

Essai 9 : Le neuvième essai est réalisé avec l'échantillon $53-106 \mu m$ (Figure A.12). La hauteur mesurée est de 6.14 mm, le diamètre de la base du tas est de 24.6 mm soit un angle de talus de 26.5° .



FIGURE A.12 – Angle de talus

Essai 10 : Le dixième essai est réalisé avec l'échantillon $10-53 \mu m$. La hauteur mesurée est de 9.3 mm, le diamètre est de 23.8 mm soit un angle de 38° . Cependant, comme le montre la figure A.13, le tas de poudre ne présente pas un angle constant et a une forme de château de sable sur le haut du tas qui correspond à l'empreinte du cylindre.



FIGURE A.13 – Angle de talus

Essai 11 : Le dernier essai est réalisé avec l'échantillon $20-38 \mu m$. La hauteur mesurée est de 7.27 mm mais le diamètre n'a pas été mesuré.

Conclusion Le tableau A.1 montre qu'il semble y avoir une équivalence du résultat d'angle de talus quel que soit le diamètre du cylindre. Le résultat du dixième essai, réalisé avec l'échantillon $10-53 \mu m$, est un tas de poudre qui présente l'empreinte du cylindre à son sommet. Ce résultat avait déjà été observé dans la simulation et cela montre bien que l'effet de l'adhésion est plus notable sur les petites particules.

Cylindre	Échantillon (μm)	Angle ($^{\circ}$)
\varnothing 5 cm	10-53 (350g)	54.4
\varnothing 5 cm	10-53 (200g)	45.6
\varnothing 5 cm	53-106 (200g)	34.8
\varnothing 1 cm	20-38	52.1
\varnothing 1 cm	10-53	50.6
\varnothing 1 cm	53-106	33.3

TABLE A.1 – Récapitulatif des mesures

Ces essais permettent de montrer la faisabilité de l'identification de l'angle de talus expérimentalement pour caractériser le paramètre d'adhésion du modèle numérique. D'autres essais sont nécessaires avec notamment un dispositif plus automatisé pour éviter l'influence de la manipulation de l'opérateur. Cela permettrait d'avoir un mouvement uniforme et équivalent à tous les essais. Une caméra doit également être mise en place afin de pouvoir mesurer l'angle de talus par analyse d'image. La hauteur du support de 1 cm de diamètre est trop importante et impacte sa stabilité, elle doit être réduite. L'état de surface des supports doit être plus propre avec une rugosité régulière.

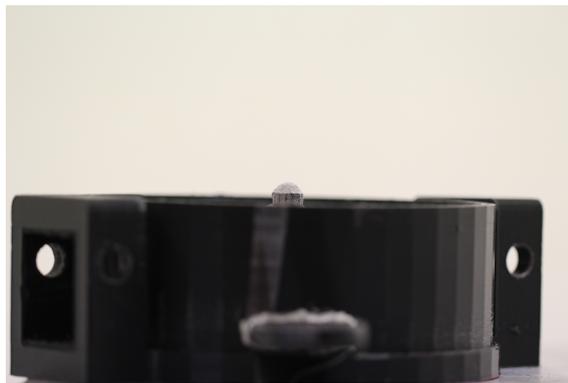
A.2 Essais avec Ti6Al4V

Une autre campagne d'essais d'angle de talus a été préparée avec un dispositif différent. Initialement prévue pour être automatisé, le dispositif est finalement déplacé à la main. Cependant, le système permet un guidage qui doit permettre un mouvement plus uniforme. Plutôt que de s'élever par le haut, le cylindre contenant la poudre s'abaisse. Pour chaque échantillon de poudre testé, trois essais sont réalisés afin de prendre en compte la variabilité du résultat. Pour chaque essai, cinq photos sont réalisées avec un angle de vue différent. La figure A.14 montre un résultat pour chaque échantillon. Le tableau A.2 répertorie les résultats obtenus pour trois échantillons de Ti6Al4V définis par leur décile 10 et décile 90 :

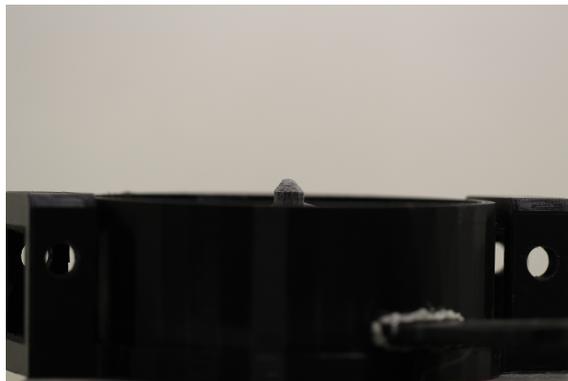
- 28-54 μm
- 15-45 μm
- 45-75 μm .



(a) 28-54 μm



(b) 15-45 μm



(c) 45-75 μm

FIGURE A.14 – Tas de poudre

Échantillon (μm)	Angle moyen ($^{\circ}$)	Minimum ($^{\circ}$)	Maximum ($^{\circ}$)
28-54	45	33.5	54
15-45	52	44	60
45-75	52	41	64

TABLE A.2 – Récapitulatif des mesures

Les résultats obtenus sont en désaccords avec les connaissances acquises précédemment concernant le fait que l'adhésion au sein des plus petites particules augmente l'angle de talus. La faible connaissance des données granulométriques des échantillons utilisés et la manipulation par un opérateur sont des facteurs qui ne permettent pas de conclure sur ces résultats. Un dispositif expérimental automatisé est nécessaire ainsi que des mesures granulométriques précises des échantillons de poudre testés.

Analyse numérique de l'étalement d'une poudre métallique : Application au procédé de fabrication additive Laser Beam Melting

Résumé : Le procédé de fusion laser de lit de poudre est un procédé de fabrication par addition de couches de matière où chaque couche est produite par une phase d'étalement de poudre et une phase de fusion laser. Il s'agit d'un procédé relativement nouveau, en phase de développement pour produire des pièces en métal. Pour continuer à développer le procédé, il faut pouvoir produire des pièces de meilleure qualité, plus rapidement et en plus grande quantité. Pour cela, les paramètres procédé, comme par exemple la vitesse du racleur ou l'épaisseur de couche, peuvent être ajustés pour réduire le temps de production ou encore la qualité de la pièce finale. Le lit de poudre doit être de bonne qualité pour que la phase de fusion laser puisse se dérouler sans défauts. Afin de mieux comprendre l'effet des paramètres procédés sur la qualité du lit de poudre, un modèle numérique a été développé pour simuler le procédé d'étalement de poudre. Afin de réaliser une simulation représentative du comportement réel des grains, il faut pouvoir identifier la valeur des paramètres matériaux de la poudre, en particulier l'adhésion. C'est pourquoi un protocole de caractérisation de l'énergie d'adhésion d'un échantillon de poudre a été développé. Il est basé sur la comparaison entre un essai expérimental et une simulation équivalente. Enfin, une méthode de caractérisation de la qualité du lit de poudre basée sur le calcul de la diffusivité thermique a été développée pour analyser les résultats d'analyses paramétriques. L'analyse de l'effet des paramètres procédé sur la qualité du lit de poudre a livré plusieurs résultats. Par exemple, le rapport entre l'épaisseur de lit de poudre et la taille de grain joue un rôle de premier ordre dans la qualité du lit de poudre. Aussi, à la différence des règles actuelles, un faible écart-type de la distribution granulométrique permet d'obtenir un meilleur lit de poudre pour de si faibles épaisseurs de couche.

Mots-clés : Méthode des Éléments Discrets, Fabrication additive, Lit de poudre, Simulation numérique, Comportement granulaire, Étalement

Numerical analysis of the spreadability of a metal powder : Application to the Laser Beam Melting additive manufacturing process

Abstract : The powder bed laser melting process is an additive manufacturing process where each layer is produced by a powder spreading phase and a lasering phase. To develop the process further, it is necessary to be able to produce parts of better quality, faster and in larger quantities. For this purpose, process parameters such as the spreader speed or the layer thickness can be adjusted to reduce the production time or the final part quality. The powder bed must be of good quality to have a good lasering phase. A numerical model was developed to simulate the powder spreading process and better understand the effect of process parameters on the powder bed quality. To perform a representative simulation of the real behavior of the grains, it is necessary to be able to identify the value of the material parameters of the powder, in particular the adhesion. This is why a protocol for characterizing the adhesion energy of a powder sample has been developed. It is based on the comparison between an experimental test and an equivalent simulation. Finally, a method for characterizing the quality of the powder bed based on the calculation of the thermal diffusivity was developed to analyze the results of parametric analyses. The analysis of the effect of the process parameters on the powder bed quality yielded several results. Among these, it showed that the ratio of the powder bed thickness to particle size plays a major role in the powder bed quality. Also, unlike the current rules, a low standard deviation of the particle size distribution allows to obtain a better powder bed for such small layer thicknesses.

Keywords : Discrete Element Method, Additive manufacturing, Powder bed, Numerical simulation, Granular behaviour, Spreadability.

