

Modélisation 3D de l'étalement de la poudre dans le procédé LBM (Laser Beam Melting) : influence de paramètres procédés et matériaux

K. Marchais^{1,2}, J. Girardot¹, C. Metton², I. Iordanoff¹

¹ Arts et Métiers ParisTech, CNRS, I2M, Talence, kevin.marchais@ensam.eu

² Safran, site de Paris-Saclay, Rue des Jeunes Bois, Chateaufort, CS 80112, 78772, Magny-les-Hameaux

Résumé — Dans le but d'optimiser la qualité des pièces produites par LBM ainsi que diminuer les coûts et les temps de fabrication, il faut maîtriser les différentes étapes du procédé. Avant de procéder à la fusion laser, il est nécessaire d'obtenir un lit de poudre de bonne qualité puisque les interactions laser-matière en dépendent. Cette étude vise à analyser l'influence de différents paramètres matériaux, procédé et numériques sur les propriétés finales du lit de poudre. La modélisation du procédé d'étalement est réalisée grâce à la méthode des éléments discrets (DEM), il s'agit d'un travail purement numérique qui s'appuie sur l'expertise et l'expérience industrielle de Safran sur le procédé LBM.

Mots clés — LBM, Méthode des éléments discrets, Comportement granulaire, Simulation procédé

1 Introduction

Dans le procédé LBM, deux étapes principales interviennent : l'étalement de la poudre et la fusion du lit de poudre par un laser. Afin d'optimiser la qualité finale de la pièce produite, le coût, et le temps de fabrication, il est important de maîtriser ces deux étapes. Pour avoir la meilleure qualité de fusion possible, il est d'abord nécessaire d'étaler une couche de poudre dont les propriétés permettent une fusion optimale. En effet, en fonction de l'agencement des grains dans le lit de poudre, les interactions laser-matière peuvent être impactées et faire varier la qualité de la pièce finale. Il est alors important de comprendre quels sont les paramètres qui jouent un rôle important lors de la phase d'étalement et d'étudier leur influence sur la géométrie finale du lit de poudre.

Ce dernier peut avoir des propriétés qui diffèrent selon plusieurs paramètres procédés. Pour fabriquer une pièce de 30 cm de hauteur, il faut environ 5000 couches de 60 μm , ce qui représente environ 13h de mise en couche. Le temps de fabrication est alors grandement impacté par le temps de mise en couche ; l'étalement de celle-ci doit être le plus rapide possible tout en produisant un lit de poudre de bonne qualité. De la même façon, s'il est possible d'étaler des couches plus épaisses, alors le nombre de couches nécessaires sera diminué et le temps total de mise en couche pourrait être réduit. Il sera alors intéressant d'étudier l'influence de la vitesse du racleur et de l'épaisseur de couche sur la qualité finale du lit de poudre.

Certaines machines utilisent une lame pour étaler la poudre alors que d'autres utilisent un rouleau. Certains racleurs sont plutôt souples (silicone par exemple) alors que d'autres sont plus rigides (métal). Il pourrait être intéressant d'observer les différences entre ces géométries. Haeri [5] a notamment étudié l'optimisation de la géométrie d'une lame pour améliorer la qualité du lit de poudre et ainsi obtenir une qualité comparable voire meilleure à celle d'un étalement avec un rouleau. Toutes les poudres ne s'étalent pas de la même façon, l'étalement dépend évidemment des caractéristiques des poudres utilisées comme la taille et la répartition des tailles de grains ou les paramètres matériaux comme le coefficient de frottement ou l'adhésion entre les grains. L'influence de ces différents paramètres pourra également être étudiée. Chen et al [2] ont observé que l'écoulement de poudres trop fines est dégradé à cause des forces d'adhésion qui deviennent trop importantes par rapport au poids des grains.

Le but de ce travail, purement numérique, est de comprendre l'influence de la vitesse du racleur, du coefficient de frottement et de l'énergie d'adhésion des poudres sur la densité finale du lit de poudre, le nombre de coordination moyen (qui correspond au nombre de contacts moyen par grain) ainsi que la taille des grains. Le modèle numérique développé pour réaliser les simulations est d'abord présenté. Puis, les résultats obtenus sont donnés et analysés.

2 Modèle numérique

2.1 Méthode numérique

La méthode des éléments discrets (DEM), initialement présentée par Cundall [3] et particulièrement adaptée à la modélisation de milieux granulaires, est la méthode numérique utilisée pour réaliser les simulations de cette étude. Chaque grain de poudre est modélisé par un élément discret et le principe fondamental de la dynamique est appliqué à chacun d'eux afin d'obtenir leur accélération. Puis, par intégration (schéma Verlet-vitesses), la vitesse et le déplacement de chaque élément sont calculés. Les principaux efforts qui interviennent dans la simulation d'un milieu granulaire sont la force de gravité et les différentes interactions entre les corps. Les simulations sont réalisées en 3D à l'aide de la plateforme open source GranOO développée en C++ [1] et basée sur la méthode des éléments discrets.

2.2 Choix des forces d'interactions

Lors d'un contact entre deux corps, une force de répulsion est générée. Il y a également une dissipation d'énergie qui implique un amortissement du choc. Il peut aussi y avoir une force qui a tendance à maintenir les corps accrochés si les corps sont adhésifs. Enfin, une force de frottements s'applique si la vitesse relative des deux corps n'est pas colinéaire à la direction du contact. Ces quatre efforts sont détaillés ci-dessous :

Force de répulsion : Modélisation de la raideur de contact entre deux grains (équation (1)). L'effort est normal (\vec{n}) à la tangente des sphères au point de contact.

$$\vec{F}_r = k\delta\vec{n} \quad (1)$$

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

Dissipation d'énergie : Une partie de l'énergie est dissipée au cours du procédé. Le modèle choisi pour représenter est décrit par l'équation (2) :

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

où α est le coefficient de dissipation, M la masse du grain, V_{rel} la vitesse relative des corps en contact.

Ce modèle permet de relier facilement le coefficient de dissipation au coefficient de restitution ϵ souvent utilisé dans les problèmes granulaires par la relation $\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{\ln(\epsilon)}\right)^2}}$.

Adhésion : Lorsque deux corps entrent en contact, il y a un gain d'énergie qui crée une force d'attraction entre eux. Le modèle choisi pour modéliser ce phénomène est décrit par l'équation (3). Celui-ci est très proche du modèle JKR [6] mais est également semblable aux modèles permettant de modéliser l'adhésion par ponts liquides lorsque le taux d'humidité est élevé dans la poudre [4].

$$\vec{F}_a = \gamma R^* \vec{n} \quad (3)$$

avec γ l'énergie de surface (J/m^2) et $R^* = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ (m) le rayon équivalent correspondant aux 2 grains.

Frottements : Lorsque deux corps sont en contact et en mouvement, un effort s'oppose au sens de déplacement de chacun des corps. C'est le frottement qui est modélisé par la loi de Coulomb (équation (4)). Ce modèle permet aussi de représenter la présence de satellites fixés autour des grains de poudres [9], augmentant ainsi artificiellement le frottement macroscopique entre deux grains.

$$\vec{F}_t = -\mu(V_{rel}^T) \left\| \sum \vec{F}_n \right\| \vec{t} \quad (4)$$

Le coefficient de frottement μ dépend de la vitesse relative entre les deux corps en contact. Si la composante tangentielle de la vitesse relative est positive alors le coefficient de frottement

est égal à $+\mu$, si elle est négative, le coefficient de frottement est égal à $-\mu$. Lorsque la vitesse relative tend vers zéro, la fonction doit être régularisée. \vec{t} est le vecteur tangentiel au contact et $\vec{F}_n = \vec{F}_r + \vec{F}_d + \vec{F}_a$.

Le principe de la méthode est représentée sur la figure 1 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.

Ici, il y a une régularisation de la force de répulsion par l'interpénétration δ et de la force de frottements par l'expression de μ . C'est une caractéristique notable de cette méthode numérique. Par opposition, la méthode Non-Smooth Contact Dynamics [7] traite les contacts de manière non régularisée.

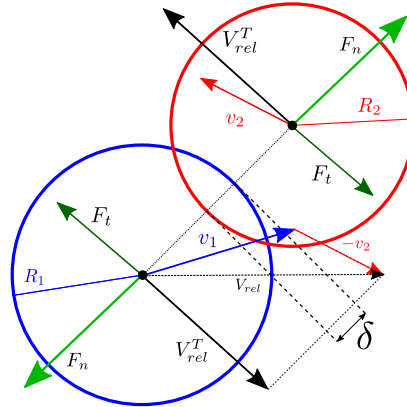


FIGURE 1 – Schéma DEM

2.3 Domaine d'étude

Pour réaliser cette étude, toutes les simulations sont menées sur la même géométrie de base, présentée sur la figure 2, qui contient un premier plateau où la poudre est approvisionnée (en bleu) et le plateau de fabrication sur lequel la poudre est étalée. Ce dernier est disposé plus bas que le premier de façon à correspondre à l'épaisseur de couche souhaitée. Le racleur utilisé est une lame supposée infiniment rigide qui avance à une vitesse V .

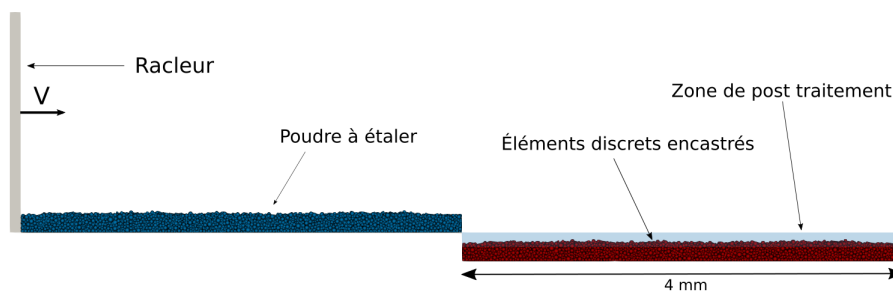


FIGURE 2 – Domaine d'étude

Dans la zone de fabrication, une couche est déjà présente (en rouge) afin de simuler la présence d'une surface rugueuse. La couche rouge contient des éléments discrets dont le mouvement est fixé afin de simuler la présence d'une surface rigide qui peut correspondre à la pièce en construction dont la couche précédente vient d'être lasée. Une surface lasée a une rugosité proche de la taille des grains donc la surface irrégulière créée par les éléments discrets permet de s'approcher de la rugosité de la pièce.

Le largeur du plateau est de $250 \mu\text{m}$ et des conditions périodiques sont appliquées aux bords afin de simuler une largeur infinie. La longueur des plateaux est de 4 mm . Le domaine d'étude est relativement petit car la méthode numérique est coûteuse en temps de calcul, il faut donc limiter le nombre d'éléments discrets. Néanmoins, cette longueur de plateau est suffisante pour observer le comportement général de la poudre lors de l'étalement. Les simulations sont réalisées avec des grains parfaitement sphériques dont la répartition des tailles suit une distribution gaussienne avec un diamètre moyen de $25 \mu\text{m}$ et un écart

type de $8 \mu m$ ce qui peut correspondre à une poudre d'IN718. Chaque couche contient 10 000 éléments discrets.

Les valeurs des paramètres utilisés dans les simulations sont répertoriées dans la table 1. La longueur du plateau est petite pour des raisons de coût de calcul. La raideur de contact est de $0.1 N/m$ car cette valeur permet d'avoir des interpénétrations assez faibles entre les grains ainsi qu'un temps de calcul acceptable. Le coefficient de restitution utilisé est $\varepsilon = 10^{-4}$ car cela permet de stabiliser le calcul. Les autres paramètres sont variables.

Paramètre	Description	Valeur
ρ	Masse volumique (kg/m^3)	8000
d	Diamètre moyen d'une particule (μm)	25
L	Longueur du plateau (mm)	4
V	Vitesse du racleur (mm/s)	50 – 250
k	Raideur de contact (N/m)	0.1
e	Coefficient de restitution	10^{-4}
γ	Énergie d'adhésion (mJ/m^2)	0 – 10
μ	Coefficient de frottement	0 – 0.9

TABLE 1 – Paramètres de simulation

La figure 3 montre le comportement de la poudre pendant l'étalement. Le racleur récupère la poudre présente sur le premier plateau et un tas se forme devant le racleur. Quand le racleur arrive au niveau de la zone de fabrication, la poudre se déverse sous le racleur pour former la nouvelle couche.

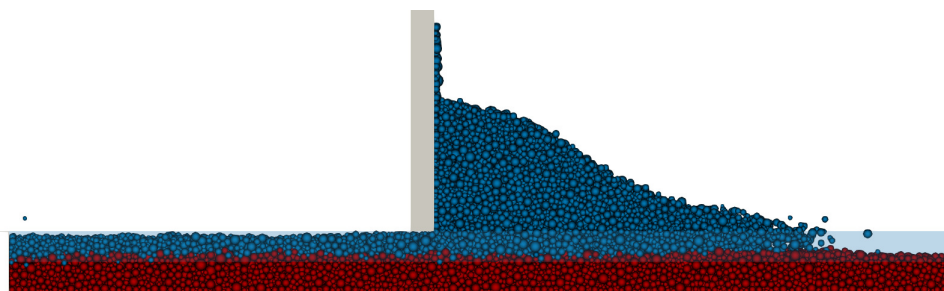


FIGURE 3 – Étalement

3 Résultats et analyses

3.1 Propriétés du lit de poudre

Afin de comparer le lit de poudre final pour différentes configurations de paramètres, il est important de définir des propriétés permettant d'analyser la qualité de celui-ci. Parmi les propriétés choisies, il y a tout d'abord la densité. Les pièces fabriquées par LBM peuvent présenter un taux de porosité important si le lit de poudre n'est pas assez dense. Il faut alors une densité la plus importante possible pour permettre une meilleure efficacité du lasage. La taille moyenne de particule en fonction de la position dans le lit de poudre peut également être analysée afin d'observer si un phénomène de ségrégation apparaît. Ce phénomène a déjà été constaté dans d'autres domaines comme dans les mélangeurs notamment [8]. L'écoulement des grains durant l'étalement peut soumettre les grains au même phénomène. L'étude de la taille des grains en fonction de la position permettra d'identifier cela et de vérifier l'homogénéité du lit de poudre. La troisième et dernière propriété choisie est le nombre de coordination. Il s'agit du nombre de contact moyen par grain. Ce paramètre est fortement lié à la conductivité thermique du lit de poudre puisque la conduction est meilleure entre les solides plutôt que dans le gaz. Ainsi, il est important d'avoir un nombre de coordination élevé et homogène.

Une zone de post traitement est alors mise en place et identifiée par la zone bleue sur la figure 2 dans le lit de poudre. Cette zone est subdivisée pour calculer les propriétés en fonction de la position dans le

lit de poudre. Ainsi, chaque cellule contient un certain nombre de grains. La densité est calculée par le rapport entre le volume de chaque grain appartenant à une maille et le volume de la maille. Le calcul de la taille moyenne des grains est évident. Enfin, pour chaque grain, le nombre contacts avec d'autres particules est compté (en prenant en considération, si nécessaire, les mailles voisines).

3.2 Influence de la 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 d'étalement (50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225 et 250 mm/s). La figure 4 montre l'évolution de la densité, de la taille moyenne des grains et du nombre de coordination moyen en fonction de la position pour les vitesses 50, 100, 150, 200 et 250 mm/s.

Comme attendu, plus l'étalement est lent meilleure est la densité du lit de poudre et plus le nombre de coordination moyen est élevé. En effet, la densité obtenue pour une vitesse de 50 mm/s dépasse les 60% alors que pour la plus haute vitesse (250 mm/s), le lit de poudre est beaucoup moins dense (40% à 50%). A noter que les valeurs mesurées aux première et dernière positions ne sont pas les plus représentatives puisqu'elles correspondent au manque de matière causé par l'inertie des grains pour le premier cas et par la chute des grains au-delà du plateau de fabrication pour le deuxième. De plus, à hautes vitesses, le lit de poudre n'est pas homogène. Le profil de la courbe de densité est irrégulier par rapport aux vitesses lentes. Le nombre de coordination dépend également de la vitesse d'étalement puisque un étalement à 50 mm/s permet d'obtenir le meilleur nombre de coordination moyen (6 en moyenne). Enfin, on observe également que la taille moyenne de particule augmente légèrement en fonction de la position dans le lit de poudre pour les vitesses les plus élevées. Il peut s'agir du phénomène de ségrégation. Il faudra observer la taille des particules rejetées au-delà de la zone de fabrication pour le confirmer. Cette étude montre également que la densité moyenne évolue comme le nombre de coordination qui peut être vu comme la densité locale.

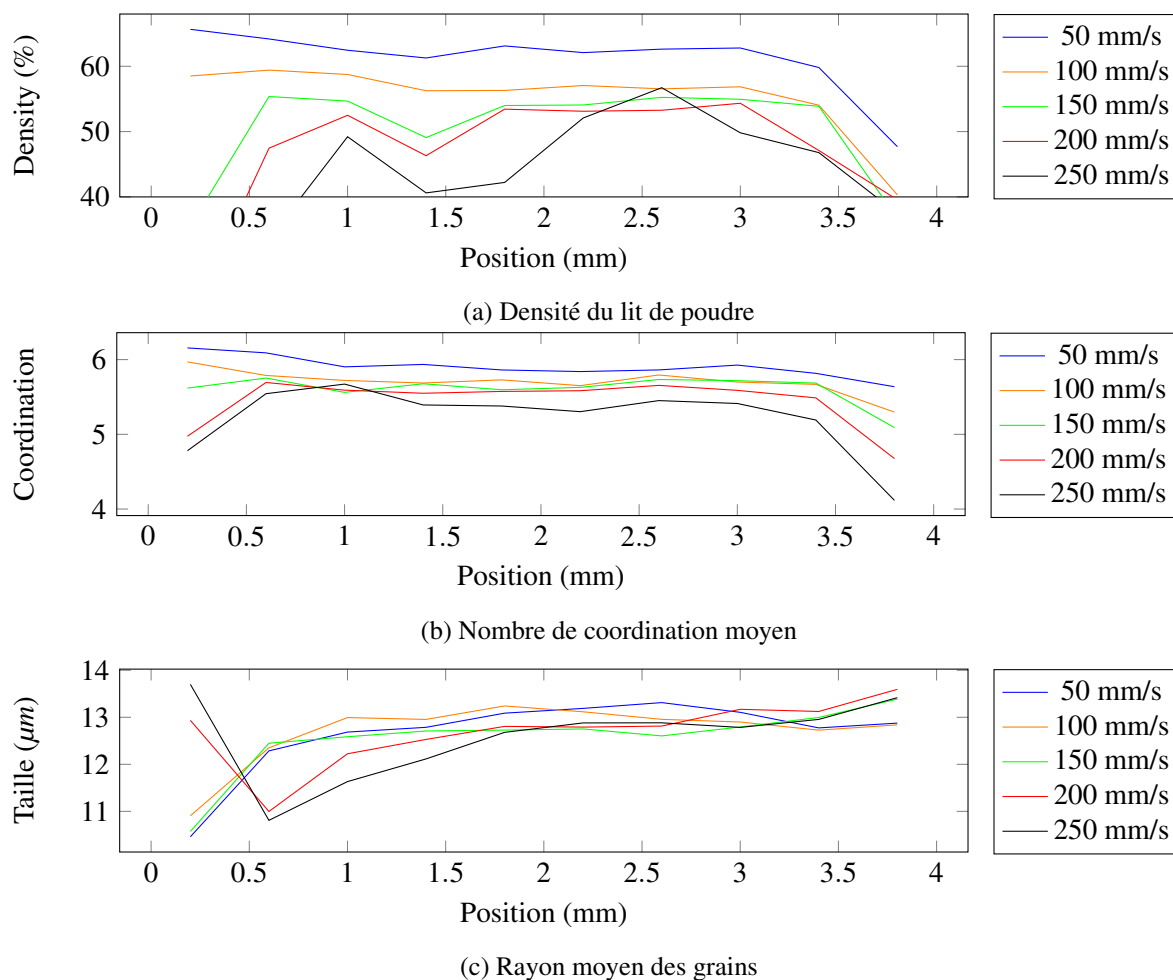


FIGURE 4 – Vitesse du racleur

3.3 Effet du coefficient de frottement

Il est nécessaire de comprendre l'influence du coefficient de frottement sur l'étalement. Même si pour un matériau donné, le coefficient de frottement est un paramètre matériau fixé, cette étude permettra de comprendre le comportement d'une poudre dont le coefficient de frottement est plus ou moins élevé. De plus, la non-sphéricité des grains pourrait peut être être modélisée par un coefficient de frottement élevé. Comme le montre la figure 5, pour les différentes valeurs du coefficient de frottement étudiées ($\mu = 0$, $\mu = 0.01$, $\mu = 0.1$, $\mu = 0.3$, $\mu = 0.9$), le lit de poudre semble avoir globalement les mêmes propriétés finales. D'après ces résultats, le coefficient de frottement a peu d'influence sur l'étalement avec le modèle numérique utilisé. Le coefficient de restitution étant très élevé, la dissipation d'énergie est très importante et puisque la force de frottements en dépend, son effet est très faible. D'autres simulations seront nécessaires avec un coefficient de restitution plus élevé.

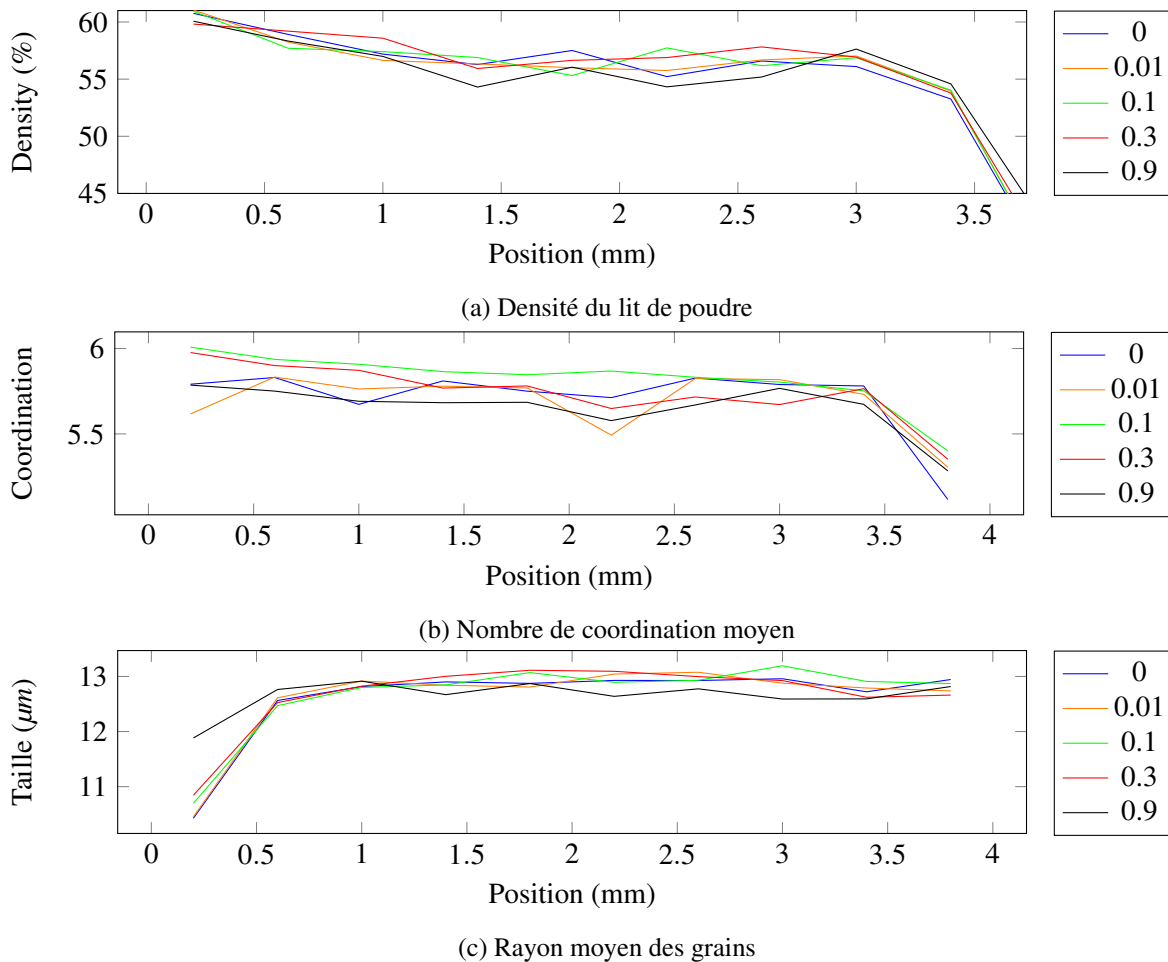


FIGURE 5 – Coefficient de frottement

3.4 Effet de l'énergie d'adhésion

Comme pour les frottements, l'adhésion dépend également du matériau de l'échantillon étudié mais aussi de l'environnement et notamment du taux d'humidité ambiante. Il est nécessaire de comprendre la différence de comportement entre une poudre non adhésive et une poudre plus ou moins adhésive. Pour cela, 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 figure 6 montre que l'adhésion a un impact important sur le lit de poudre final. Contrairement à l'étude sur la vitesse du racleur, la densité et le nombre de coordination évoluent dans le sens contraire en fonction de l'énergie d'adhésion. La densité moyenne et la densité locale sont donc très différentes. Pour une poudre très cohésive, il y aura des amas de particules où la densité sera très élevée localement (nombre de coordination élevé) mais aussi des cavités qui dégradent la densité moyenne du lit de poudre comme le montrent les figures 6a et

7. Enfin, entre 0 et 0.5 mJ/m^2 , il y a peu d'influence sur la densité du lit de poudre ainsi que sur la taille des particules. Pour 1 mJ/m^2 , la densité est n'est pas impactée mais la taille des grains augmente avec la position. Il semble alors y avoir un effet de seuil (pour $\gamma \sim 0.5 - 1 \text{ mJ/m}^2$). Cela permettra de définir les contraintes liées à l'atmosphère contrôlée pour maîtriser l'adhésivité de la poudre.

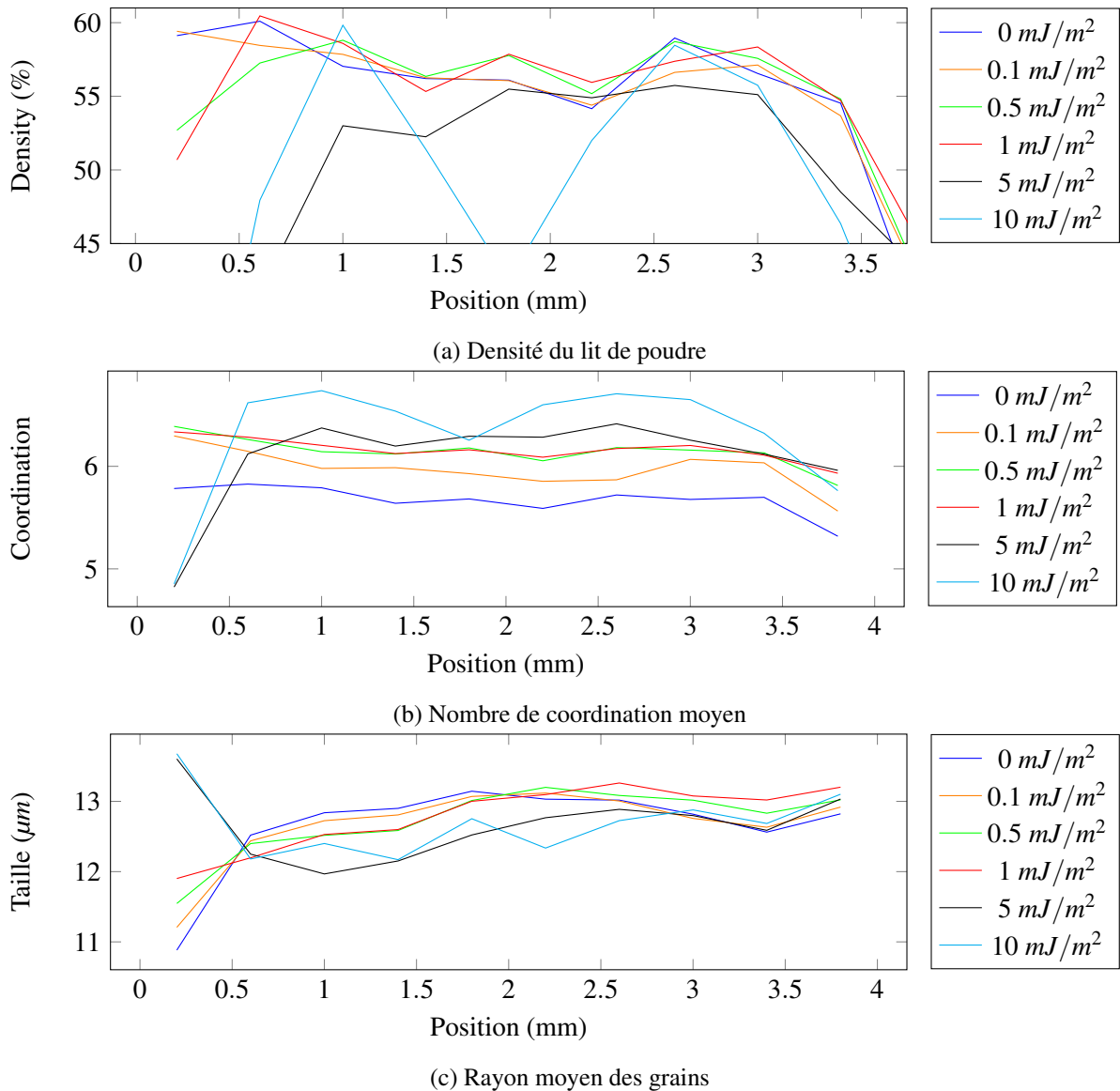


FIGURE 6 – Énergie d'adhésion

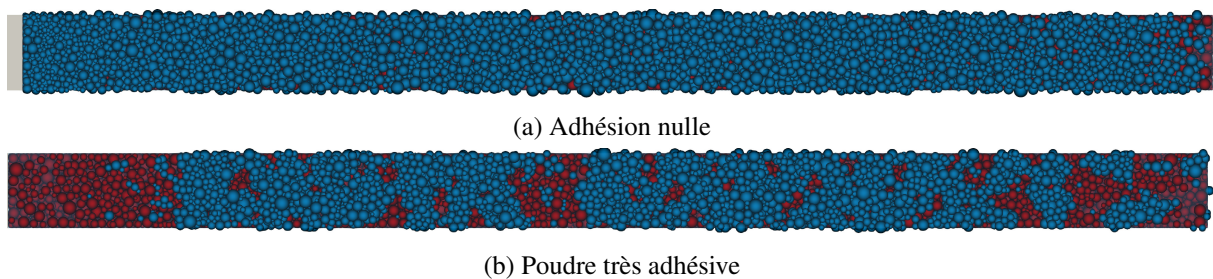


FIGURE 7 – Lit de poudre - Vue de dessus

Au contraire, le lit de poudre obtenu avec une poudre non adhésive est plutôt dense mais présente un nombre de coordination faible par rapport aux autres essais. Les simulations réalisées avec $\gamma = 1 \text{ mJ/m}^2$ et $\gamma = 0.5 \text{ mJ/m}^2$ permettent d'obtenir une densité semblable à celle obtenue avec $\gamma = 0 \text{ mJ/m}^2$ avec un nombre de coordination bien plus élevé.

4 Conclusion

Les différentes analyses réalisées ont permis de montrer que la vitesse d'étalement a une influence non négligeable sur les propriétés du lit de poudre final. Le meilleur lit de poudre a été obtenu avec la vitesse d'étalement la plus faible. En revanche, il est nécessaire de réaliser l'étalement le plus rapidement possible pour minimiser le temps de fabrication. Il faut alors trouver un compromis entre la qualité du lit de poudre final et le temps total de mise en couche. Cela a également permis d'observer le phénomène de ségrégation lorsque les grains les plus gros ont tendance à rester en surface lors de l'étalement et se retrouvent sur la fin de la zone d'étalement. L'étude de la population des grains rejetés au-delà de la zone de fabrication devra être étudiée. Les trois analyses montrent également que la densité diminue faiblement avec la position. Cela est peut-être dû au poids de la colonne de poudre qui diminue au fur et à mesure que la poudre est étalée. D'autres paramètres procédés seront étudiés comme la géométrie du racleur, la géométrie du plateau, la quantité de poudre ou l'épaisseur de couche étalée par exemple. De la même manière que pour les hautes vitesses de racleur qui permettraient d'obtenir des temps de fabrication plus courts, l'étalement de couches épaisses permettrait de fabriquer moins de couches et ainsi accélérer la fabrication. Le coefficient de frottement ne semble pas avoir un impact important sur le lit de poudre final pour les simulations réalisées. Enfin, l'énergie d'adhésion a un impact important sur le comportement de la poudre lors de l'étalement. Une poudre peu adhésive donnera un lit de poudre plutôt homogène mais avec un nombre de coordination et une conductivité thermique faible. Alors qu'une poudre très adhésive résultera en un lit de poudre très irrégulier formé par des amas et des cavités. Un environnement humide sera alors néfaste pour les poudres par exemple. Pour réaliser une simulation représentative d'un étalement réel, l'énergie d'adhésion devra donc être déterminée précisément pour l'échantillon de poudre étudié. Ainsi, il est nécessaire de développer une démarche permettant de caractériser les paramètres matériaux des poudres, notamment l'adhésion qui apparaît comme un paramètre prépondérant dans la qualité du lit de poudre final.

5 Remerciements

Toutes les simulations ont été réalisées via le logiciel GranOO : www.granoo.org

Références

- [1] D. André, J. L. Charles, I. Iordanoff, J. Néauport, *The GranOO workbench, a new tool for developing discrete element simulations, and its application to tribological problems*, Advances in Engineering Software, Volume 74, p. 40-48, 2014
- [2] H. Chen, Q. Wei, S. Wen, Z. Li, 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, 2017
- [3] P. A. Cundall, O. D. L. Strack, *A discrete numerical model for granular assemblies*, Géotechnique, Volume 29 Issue 1, p. 47-65, 1979
- [4] A. Gladkyy, R. Schwarze, *Comparison of different capillary bridge models for application in the discrete element method*, Granular Matter, Volume 16, Issue 6, p.911-920, 2014
- [5] S. Haeri, *Optimisation of blade type spreaders for powder bed preparation in Additive Manufacturing using DEM simulations*, Powder Technology, 321, p. 94-104, 2017
- [6] K. L. Johnson, K. Kendall, A. D. Roberts, *Surface energy and the contact of elastic solids*, Proc. R. Soc. Lond. Ser. A., vol. 324, p. 301-313, 1971
- [7] J. J. Moreau, P. D. Panagiotopoulos, *Non-smooth mechanics and applications*, Springer-Verlag Wien, 1988
- [8] P. Porion, N. Sommier, A. M. Faugère, P. Evesque, *Dynamics of size segregation and mixing of granular materials in a 3D-blender by NMR imaging investigation*, Powder Technology, 141, p. 55-68, 2004
- [9] J. H. Tan, W. L. E. Wong, K. W. Dalgarno, *An overview of powder granulometry on feedstock and part performance in the selective laser melting process*, Additive Manufacturing, 18, p. 228-255, 2017