HAL
open science

Étalabilité d'une poudre dans les procédés de fabrication additive : analyse numérique et discrète

Kevin Marchais, Jérémie Girardot, Charlotte Metton, Ivan Iordanoff

To cite this version:

Kevin Marchais, Jérémie Girardot, Charlotte Metton, Ivan Iordanoff. Étalabilité d'une poudre dans les procédés de fabrication additive : analyse numérique et discrète. 15ème colloque national en calcul des structures, Université Polytechnique Hauts-de-France [UPHF], May 2022, 83400 Hyères-les-Palmiers, France. hal-03717613

HAL Id: hal-03717613

https://hal.science/hal-03717613v1

Submitted on 8 Jul 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.

CSMA 2022
15ème Colloque National en Calcul des Structures
16-20 Mai 2022, Presqu'île de Giens (Var)

Étalabilité d'une poudre dans les procédés de fabrication additive : analyse numérique et discrète

K. Marchais[1,2], J. Girardot[1], C. Metton[2], I. Iordanoff[1]

[1] *Arts et Métiers Science et Technologie, I2M, UMR CNRS 5295, 33400 Talence*
[2] *Safran Additive Manufacturing, a technology platform of Safran Tech, Rue des Jeunes Bois, Châteaufort, 78114 Magny-Les-Hameaux*
kevin.marchais@ensam.eu

Résumé — Dans le but d'optimiser les procédés de fabrication additive à base de lit de poudre, il est important de maîtriser les différentes étapes du procédé. Il est notamment nécessaire d'obtenir un lit de poudre de bonne qualité puisque les interactions laser-matière en dépendent. Cette étude numérique vise à analyser l'influence de différents paramètres procédé sur la qualité du lit de poudre au moyen d'un calcul basé sur la méthode des éléments discrets. Deux méthodes de caractérisation de la qualité du lit de poudre sont proposées comme post-traitement à ces simulations qui ont permis de proposer une méthodologie pour construire des courbes d'étalabilité.
Mots clés — Étalabilité, Méthode des Éléments Discrets, Fabrication additive, Lit de poudre, Simulation numérique

1 Introduction

Les procédés de fabrication additive à base de lit de poudre tels que le Laser Powder Bed Fusion (LPBF), le Selective Laser Sintering (SLS) ou l'Electron Beam Melting (EBM) nécessitent d'étaler un lit de poudre avant de réaliser le frittage ou la fusion de la poudre pour chaque couche. Il est important que le lit de poudre étalé soit de bonne qualité pour garantir une couche de matière solide homogène et sans défauts.

De nombreux paramètres entrent en jeu lors de la fabrication d'une pièce avec de tels procédés. Concernant l'étalement de la poudre, plusieurs paramètres liés à la granulométrie (taille, morphologie) peuvent avoir un effet sur son étalabilité ainsi que des paramètres machine tels que la forme et la vitesse du racleur ou l'épaisseur de couche étalée. Enfin, le taux d'humidité peut influencer les forces d'adhésion entre les grains de poudre et ainsi impacter son étalabilité [1, 2, 3].

Le but de ce travail, purement numérique, est de comprendre l'influence de l'épaisseur du lit de poudre, de la granulométrie, de la rugosité de la couche inférieure et des conditions environnementales sur la qualité finale de l'étalement, en se basant sur un modèle discret développé et décrit dans un travail précédent [1]. Deux méthodes permettant de caractériser la qualité du lit de poudre sont d'abord présentées avant de montrer les résultats et analyser l'effet des différents paramètres procédé.

2 Modèle numérique

2.1 Simulation de l'étalement

La simulation de l'étalement de la poudre est réalisée avec la méthode des éléments discrets (DEM) où chaque grain de poudre est représenté par un élément. Différentes forces d'interactions sont générées lors des contacts entre les grains (répulsion, frottement, adhésion) pour reproduire le comportement granulaire de la poudre. Le matériau considéré dans cette étude est un alliage métallique d'Inconel 718. La répartition des tailles de grains est modélisée par une loi normale et les grais sont considérés parfaitement sphériques. La rugosité de la couche précédente sur laquelle est étalée la poudre est prise en compte et est modélisée par une disposition régulière d'éléments discrets fixés. Dans cette étude, le racleur est une lame rigide dont la rugosité est également modélisée. Afin de limiter le coût de calcul déjà important, des conditions périodiques sont mises en place sur les bords du domaine dans le sens de la largeur. Le

domaine de calcul fait 300 μm de large soit environ dix fois la taille d'un grain. Le développement de la simulation de l'étalement de poudre est détaillé dans les études réalisées précédemment [1, 4]. La figure 1 illustre la simulation de l'étalement.

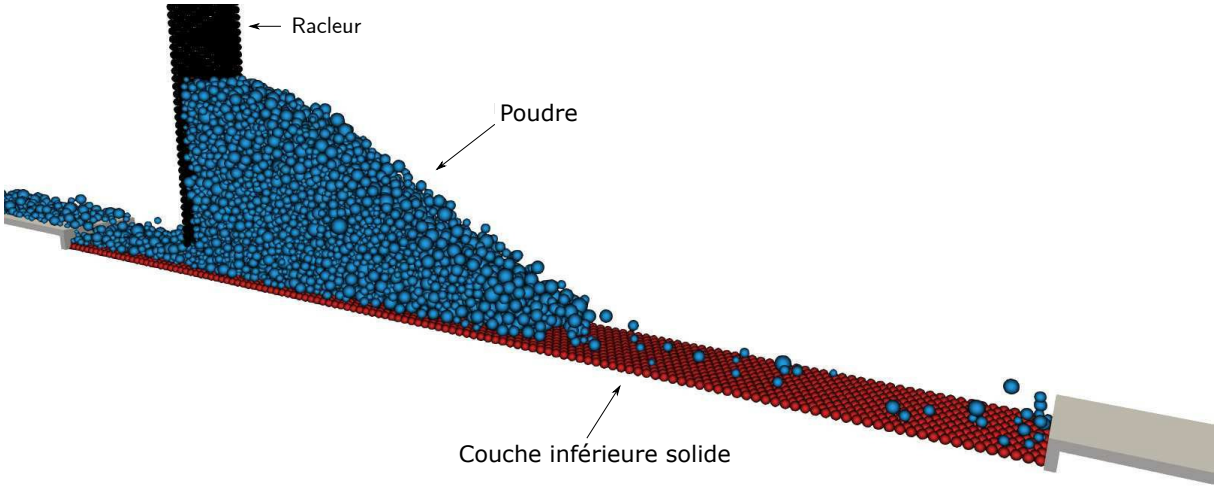


FIGURE 1 – Simulation 3D de l'étalement de poudre.

2.2 Caractérisation de la qualité du lit de poudre

L'analyse de l'effet des paramètres procédé sur le lit de poudre étalé nécessite de développer des méthodes permettant de caractériser la qualité du lit de poudre. Deux méthodes sont proposées ici.

2.2.1 Analyse d'image

Une image en vue de dessus du lit de poudre permet d'estimer la qualité du lit de poudre *à vue d'oeil*. Numériquement, la densité de pixels sur une telle image permettrait d'évaluer la qualité du lit de poudre étalé. 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 représentant des disques (en bleu sur la figure 2) ayant le même diamètre que l'élément discret. 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 bleus plus important qu'un mauvais lit de poudre. La figure 2 montre la différence entre un lit de poudre considéré comme peu homogène correspondant à un taux de pixels non blancs de 50.2 % et un lit de poudre considéré comme homogène dont le taux de pixels non blancs est de 99.9 %.

(a) Taux de pixels non blancs : 50.2 %.

(b) Taux de pixels non blancs : 99.9 %.

FIGURE 2 – Analyse d'image du lit de poudre.

2.2.2 Diffusivité dans le lit de poudre

Afin de caractériser la densité et l'homogénéité au sein du lit de poudre dans les trois dimensions, une autre solution consiste à mesurer la diffusivité au sein du lit de poudre. Plus le lit de poudre est dense et homogène plus la diffusivité est élevée. Pour celà, il est possible de s'inspirer des méthodes

permettant de mesurer la diffusivité thermique d'un matériau comme le fait la méthode Flash par exemple [5]. La méthode Flash 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. Le temps $t_{1/2}$ nécessaire pour atteindre la moitié de la variation maximale de la température permet ainsi de déterminer la diffusivité thermique a du matériau par la relation $a = 0.1388\frac{d^2}{t_{1/2}}$ [6] où d est la longueur de l'échantillon. La géométrie du lit de poudre est très différente des échantillons utilisés avec la méthode Flash. La faible épaisseur du lit de poudre et la nature hétérogène du milieu forment des différences importantes par rapport à la géométrie des échantillons utilisés par cette méthode. Pour cette raison, plusieurs modifications sont nécessaires.

La méthode numérique consiste à appliquer une quantité de chaleur initiale au centre du lit de poudre (figure 3) puis à la laisser se diffuser au sein du lit de poudre (adiabatique). L'évolution de la température est modélisée par l'équation de la chaleur appliquée au milieu granulaire. L'équation 1 présente l'équation de la chaleur discrétisée. La température est considérée parfaitement homogène au sein d'un grain.

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \frac{\lambda}{\rho C_p}\Delta t \sum_j^{n_c} \Delta T_{ij}, \tag{1}$$

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. La diffusion thermique a lieu uniquement lorsqu'il y a un contact entre deux grains (au sens de la DEM, dans notre cas, un contact est identifié lorsqu'une interpénétration a lieu entre deux éléments sphériques).

Soit deux grains en contact, de rayons respectifs R_i et R_j, la variation de température du grain i est calculée par : $\Delta T_{ij} = \frac{(T_j - T_i)\pi R^{*2} c_a}{d_{ij} V_i}$ [7] 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. Afin de prendre en compte des grains en contact proche, notamment les plus petit qui peuvent se retrouver bloqués dans les interstices de la rugosité de la surface sur laquelle est étalée la poudre, le rayon de la sphère de contact des grains est légèrement augmenté.

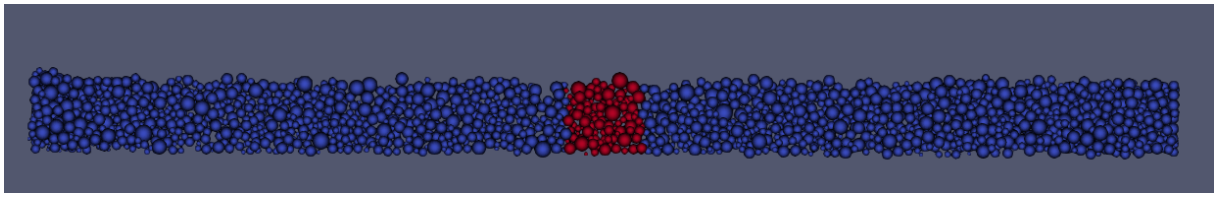


FIGURE 3 – Quantité de chaleur initiale au centre.

Ici, le temps $t_{1/2}$ correspond au temps nécessaire pour atteindre la moitié de la variation maximale de la température dans la zone où a été appliquée la quantité de chaleur initiale. Compte-tenu des différences par rapport à la méthode Flash et des paramètres numériques utilisés, la relation entre la diffusivité et le temps $t_{1/2}$ n'est pas la même. Cependant, la diffusivité évolue de la même façon que $\frac{1}{t_{1/2}}$. Par exemple, un temps $t_{1/2}$ élevé caractérise une mauvaise diffusivité.

La figure 4 montre l'évolution de la température au sein de la zone initialement chauffée. La température finale théorique T_{inf} est connue puisque la même quantité de chaleur est présente à l'état initial et à l'état final ($Q = m_i C_p T_i = m_f C_p T_f$ avec m_i, T_i sont respectivement la masse et la température de la zone chauffée initialement et m_f et T_f la masse et la température de l'ensemble des grains du lit de poudre). Lorsque la température atteint $T_{1/2} = T_{\text{inf}}/2$ 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 $t_{1/2}$ est considéré égal à l'infini.

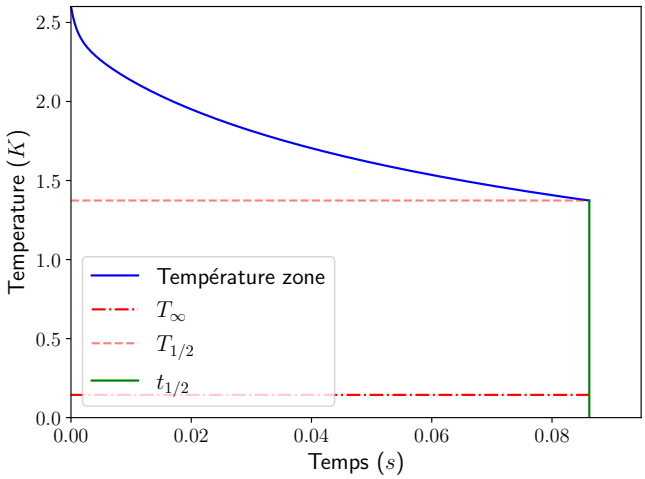


FIGURE 4 – Évolution de la température en fonction du temps pour un lit de poudre préalablement étalé par le modèle discret.

3 Résultats et analyses

3.1 Définition d'un paramètre réduit

L'épaisseur de couche notée E et la taille moyenne de grain notée μ sont des paramètres couplés. En effet, plus il y a de grains dans la hauteur de couche étalée, plus la densité est élevée [8]. Comme montré dans la suite, une méthode efficace pour analyser le couplage entre les différents paramètres procédé 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 5 et 6 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 $\mu = 20, 30, 40 \mu m$ (soit trois résultats par rapport E/μ) 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 5 représente la qualité du lit de poudre au sens de la densité de pixels en fonction du rapport E/μ alors que la figure 6 représente la qualité au sens de la diffusivité.

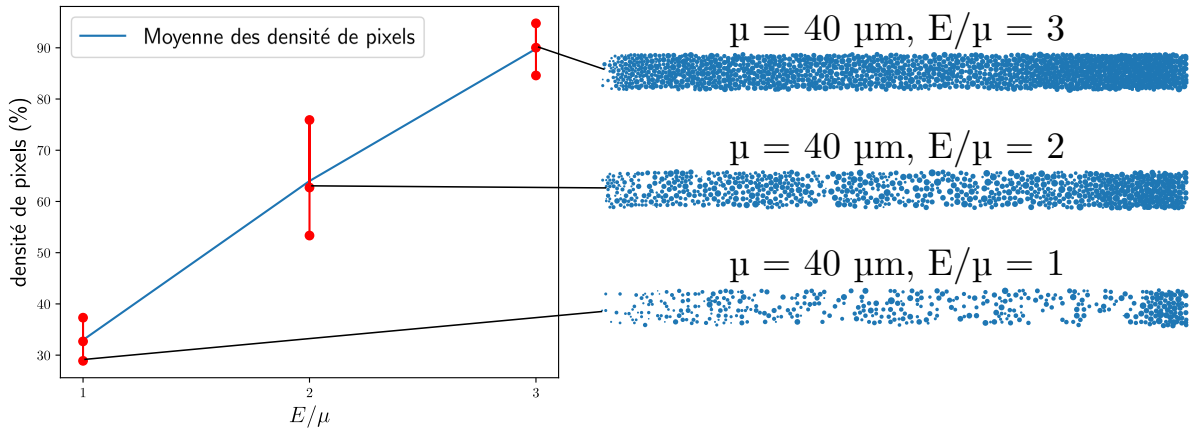


FIGURE 5 – Évolution de la densité de pixels en fonction du paramètre réduit E/μ.

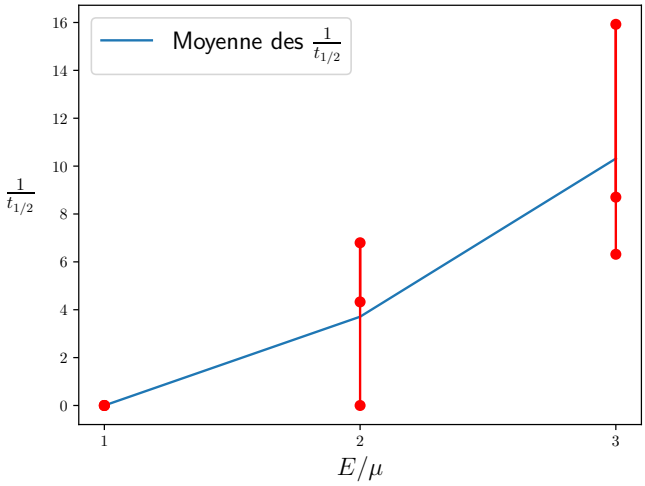


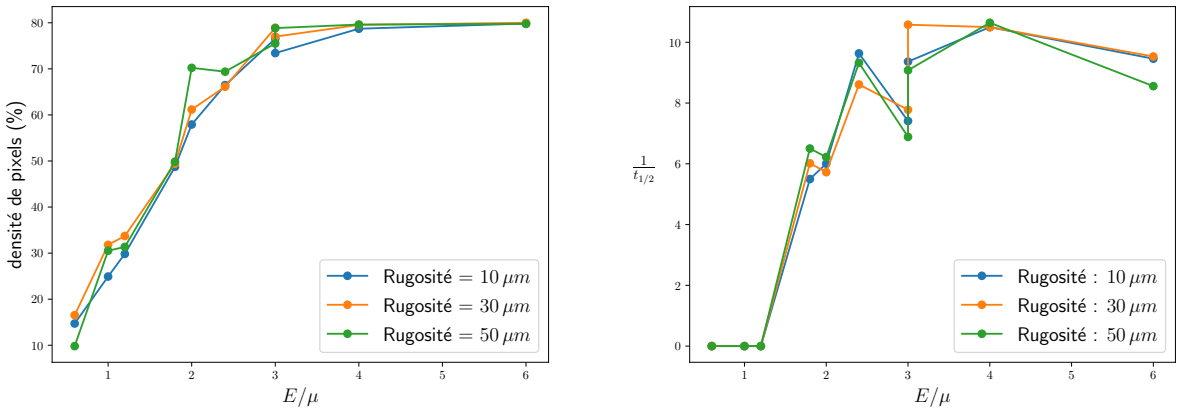
FIGURE 6 – Évolution de $\frac{1}{t_{1/2}}$ en fonction du paramètre réduit E/μ.

Comme attendu, 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.

3.2 Rugosité

Dans la simulation, la surface sur laquelle est réalisé l'étalement ne peut pas être parfaitement lisse car en réalité, la surface de la couche inférieure présente une certaine rugosité qui peut être différente selon la nature du matériau. Sur une surface lisse, les grains glisseraient et le comportement global de la poudre ne serait pas réaliste.

Cette étude permet donc d'observer l'influence de la rugosité de surface sur la qualité de l'étalement. 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).



(a) Analyse par densité de pixels.

(b) Calcul de la diffusivité.

FIGURE 7 – Effet de la rugosité.

Comme le montre les figures 7a et 7b, il n'y a pas d'effet de la rugosité puisque les courbes sont quasiment confondues.

3.3 Granulométrie

Il est souvent admis que dans un milieu granulaire, une distribution granulométrique avec des particules de différentes tailles permet d'obtenir une meilleure densité qu'avec un échantillon dont tous les grains ont la même taille. Il est alors intéressant d'analyser l'effet de l'écart-type de la distribution granulométrique sur la qualité du lit de poudre. La figure 8 montre des résultats de lits de poudre obtenus avec un échantillon dont la distribution granulométrique est modélisée par une loi normale avec une taille de grain moyenne de 30 μm et un écart-type qui varie entre 0 et 15 μm. Lorsque l'écart-type est faible, la densité du lit de poudre semble meilleure. Ce résultat qui semble étonnant 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. Les propriétés du milieu granulaire peuvent donc être différentes par rapport à un milieu 3D classique avec un volume plus important.

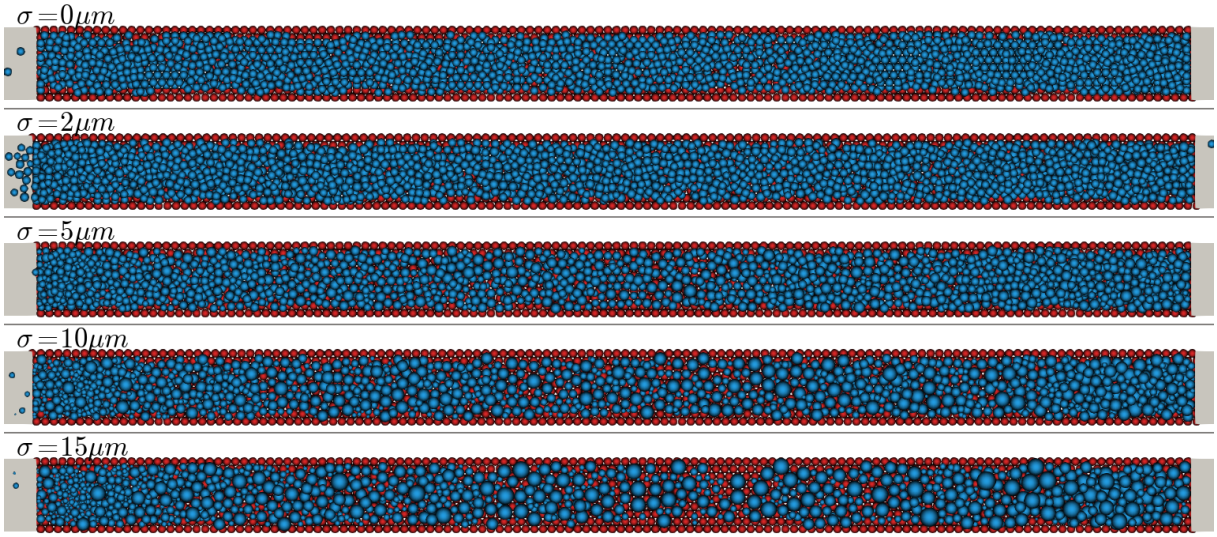
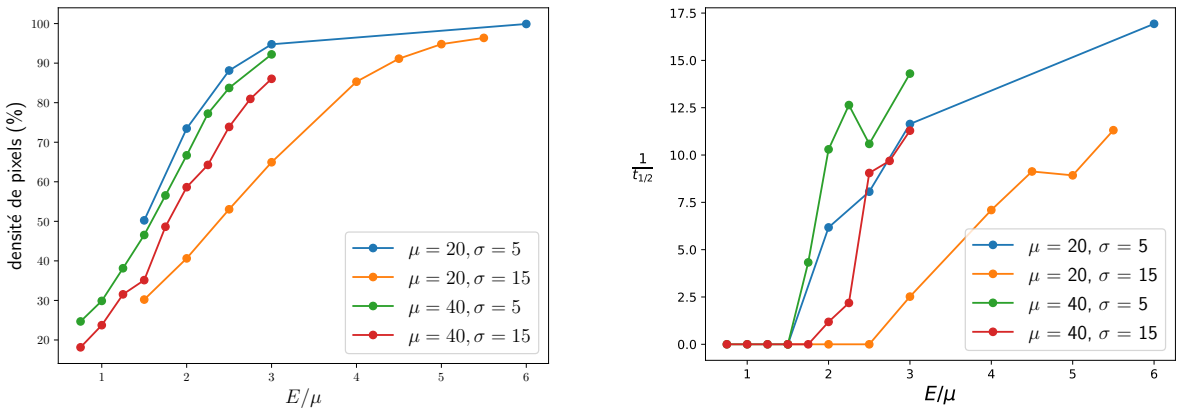


FIGURE 8 – Effet de l'écart-type de la distribution granulométrique, noté σ, sur l'étalement.

Pour vérifier que ce résultat n'est pas lié à l'effet de la taille moyenne de grain qui pourrait concorder avec la rugosité de la couche précédente ou l'épaisseur de couche par exemple, d'autres études sont réalisées en faisant varier la taille moyenne. Les quatre échantillons suivant sont testés :

- 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 $\sigma = 15\mu m$



(a) Analyse par densité de pixels.

(b) Calcul de la diffusivité.

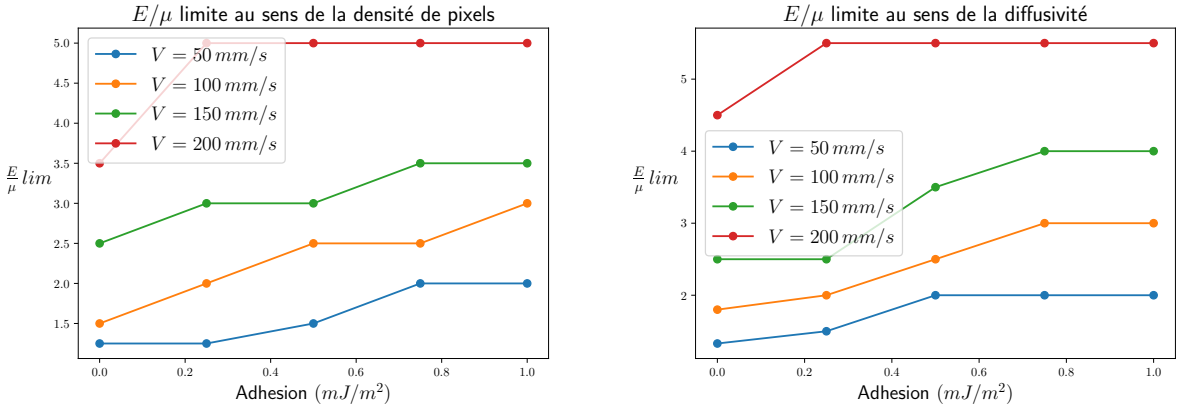
FIGURE 9 – Effet de la granulométrie.

Les figures 9a et 9b 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 ($\sim$ 5 à 35 μm contre $\sim$ 25 à 55 μm pour la courbe rouge). Cette étude confirme donc que la dispersion de taille a un effet négatif sur la qualité du lit de poudre.

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.

3.4 Couplage vitesse du racleur/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 10a 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 10b 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.



(a) E/μ limite lorsque la densité de pixels $< 50\%$.

(b) E/μ limite lorsque $t_{1/2}$ est infini.

FIGURE 10 – Couplage Vitesse racleur/Adhésion poudre.

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 et, à la connaissance des auteurs, sont une première approche cartographique pour illustrer l'étalabilité d'une poudre.

4 Conclusion

Si la rugosité de la couche inférieure n'impacte pas la qualité de l'étalement, la granulométrie en revanche joue un rôle important. En particulier la largeur de la distribution granulométrique qui permet d'obtenir de meilleurs résultats lorsque celle-ci est plutôt étroite. Le rapport $\frac{E}{\mu}$ est un paramètre essentiel à prendre en compte lors de l'étalement de la poudre. 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. Les méthodes présentées ici permettent de définir des plages d'étalabilité en fonction du rapport limite $\frac{E}{\mu}$ comme dans le cas de l'étude sur la vitesse de racleur et l'adhésion au sein de la poudre.

5 Remerciements

Toutes les simulations dans ce travail ont été développées à l'aide de la plateforme de calcul discret GranOO, accessible à l'adresse : www.granoo.org

Références

[1] K. Marchais, J. Girardot, C. Metton, I. Iordanoff. *A 3D DEM simulation to study the influence of material and process parameters on spreading of metallic powder in additive manufacturing*, Computational Particle Mechanics, 2021.

[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, 123, 146-159, 2017.

[3] C. Meier, R. Weissbach, J. Weinberg, W. A. Wall, J. Hart. *Critical Influences of Particle Size and Adhesion on the Powder Layer Uniformity in Metal Additive Manufacturing*, Journal of Materials Processing Technology, 266, 484-501, 2019.

[4] K. Marchais, J. Girardot, C. Metton, I. Iordanoff. *Modélisation 3D de l'étalement de la poudre dans le procédé LBM (Laser Beam Melting) : influence de paramètres procédés et matériaux*, CSMA 2019.

[5] W. J. Parker, W. J. Jenkins, C. P. Butler, G. L. Abbott. *Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity*, Journal of Applied Physics, 32, 9, 1679-1684, 1961.

[6] H. S. Carslaw, J. C. Jaeger. *Conduction of heat in solids*, Oxford Science Publications, 1959.

[7] I. Terreros, I. Iordanoff, J. C. Charles, D. Coupard, S. Tcherniaieff. *Discrete Element Method, a tool to investigate complex thermo mechanical behaviour : Application to friction stir welding*, International Journal of Material Forming, 2, 573-576, 2009.

[8] Y. M. Fouda, A. E. Bayly. *A DEM study of powder spreading in additive layer manufacturing*, Granular Matter, 22, 1-18, 2020.