



HAL
open science

Une nouvelle méthode pour dépoudrer des pièces issues du procédé de fusion par faisceau d'électrons

Pierre-Thomas Dautre, Christelle Grandvallet, Matthieu Museau

► To cite this version:

Pierre-Thomas Dautre, Christelle Grandvallet, Matthieu Museau. Une nouvelle méthode pour dépoudrer des pièces issues du procédé de fusion par faisceau d'électrons. S-MART 2023 -18ème colloque national S.mart, 4-6 avril 2023, Carry le Rouet, France, Arts et Métiers Paristech ENSAM Aix-en-Provence; Université de Toulon, Apr 2023, Carry-Le-Rouet (13), France. hal-04284186

HAL Id: hal-04284186

<https://hal.science/hal-04284186v1>

Submitted on 14 Nov 2023

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.

Une nouvelle méthode pour dépoudrer des pièces issues du procédé de fusion par faisceau d'électrons.

P-T. Doutré^a, C. Grandvallet^a, M. Museau^a

^aUniv. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, Grenoble, F-38000, France.

* e-mail : Pierre-thomas.doutré@grenoble-inp.fr

1. INTRODUCTION, ETAT DE L'ART ET OBJECTIF

1.1. Introduction : à propos de la technologie de fabrication EBM (Electron Beam Melting)

La fusion sur lit de poudre (ou PBF Powder Bed Fusion) est un procédé de fabrication additive relativement récent qui comprend le frittage laser direct de métal (ou DMLS Direct Metal Laser Sintering), la fusion par faisceau d'électrons (ou EBM Electron Beam Melting), la fusion laser (ou SLM Selective Laser Melting) et le frittage sélectif par laser (ou SLS Selective Laser Sintering). Ces technologies permettent de réaliser des pièces de forme complexe répondant à des spécifications précises [1]. Elles repoussent ainsi les frontières de la conception de pièces en permettant la réalisation des meilleures formes possibles [2-5]. Cependant, ces technologies peuvent être différentes en termes d'étapes de fabrication. Par exemple, la technologie EBM comprend sept étapes, de la conception assistée par ordinateur (CAO) au contrôle de la qualité (Figure 1) [6].

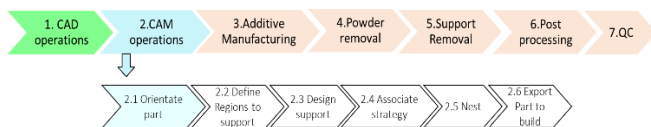


Figure 1 - Etapes du procédé de fabrication EBM

Parmi ces étapes, l'opération de dépoufrage peut être critique, en effet certaines géométries complexes ne peuvent pas être dépoufrée et le temps de dépoufrage sur certaines pièces peut vite devenir important. C'est une opération qui consiste à récupérer la poudre consolidée, aussi appelée "gâteau", dans le but de la recycler et de la réutiliser dans une autre fabrication. L'enlèvement de la poudre suit l'étape de fabrication additive et précède l'enlèvement des supports. Pour de nombreuses raisons, le dépoufrage a un impact important sur la qualité de la pièce, la durée du post-traitement, la santé et la sécurité, l'état de surface de la pièce... Lors de cette étape de

dépoufrage, les pièces sont préalablement piégées dans le gâteau de poudre de titane consolidé et doivent être retirée. Pour réaliser cette opération, un système d'enlèvement de poudre (ou PRS Powder Recovery System) est utilisé [7] et consiste à projeter sur le gâteau de la poudre de titane sous une pression d'air de 5 bars. La poudre est ensuite tamisée afin d'être réutilisée. Sur la base de ces observations, le taux de réussite du dépoufrage par PRS est variable en fonction des caractéristiques ou spécificités des pièces. Par exemple, certaines formes comme des surfaces internes complexes ou des trous (trous borgnes ou trous traversants) restent difficiles à dépoufrer.



Figure 2 - Volume de poudre consolidée à dépoufrer

1.2. Etat de l'art

Aujourd'hui, peu d'études sur le dépoufrage sont disponibles pour les technologies PBF. Parmi ces dernières, le procédé EBM est le seul à devoir inclure l'étape spécifique de dépoufrage dans son processus de fabrication. En effet, les procédés DMLS, SHS, SLM et SLS ne rencontrent pas ce problème puisque, lors de la fabrication additive, la poudre n'est pas consolidée. En ce qui concerne la technologie EBM, le moyen conventionnel d'élimination de la poudre est jusqu'à maintenant le PRS [7]. Des travaux de recherche ont

été menés par Vayre [8] et permettent de prédire la capacité des moyens de dépoudrage. Vayre propose une hauteur moyenne de dépoudrage en fonction du diamètre d'un cylindre contenant de la poudre consolidée. Sa proposition a conduit à un rapport "hauteur dépoudrable"/diamètre de 2 à 3 en utilisant uniquement le PRS(Figure 3).

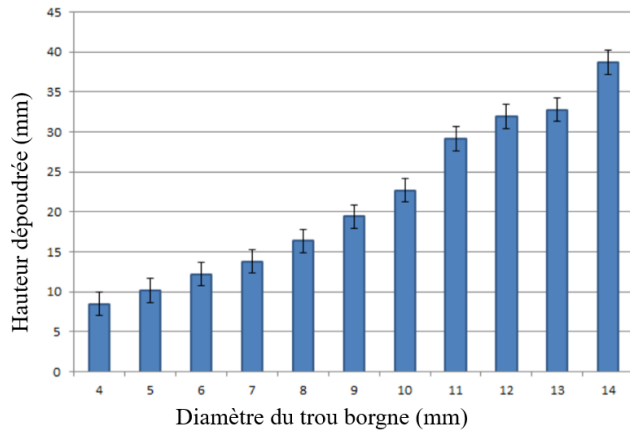


Figure 3 - Hauteur moyenne dépoudrable en fonction du diamètre du cylindre [8]

D'autres recherches récentes ont également été menées par Carre et al. [9] ; elles prédisent la capacité de dépoudrage des structures en treillis en fonction du diamètre hydraulique. Toutes ces approches caractérisent la capacité de dépoudrage par la mise en œuvre d'un PRS [7], mais peu de choses sont décrites sur les autres approches de travail. Lopes et al. [10] fournissent un état de l'art des différents moyens de dépoudrage pour la technologie EBM. Ces auteurs ont réalisé une première opération de dépoudrage grâce au PRS et ont réussi à retirer environ 3 grammes sur 6 de poudre consolidée. Pour ce faire, ils ont appliqué six méthodes de dépoudrage pour éliminer la poudre restante. Les meilleurs résultats ont permis d'éliminer un maximum de 0,17 gramme supplémentaire de poudre. Différents diamètres et formes ont été étudiés (Figure 4).

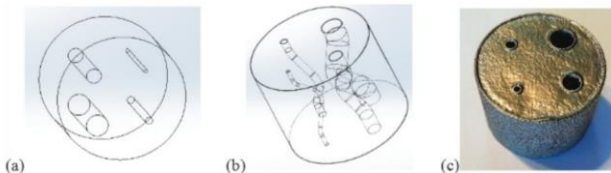


Figure 4 - (a) CAO comportant des canaux droits, (b) CAO comportant des canaux courbes, (c) pièce fabriquée par fabrication additive [10]

Les mêmes auteurs montrent que les solutions efficaces sont à base de liquide. Cependant, de tels milieux ne permettent pas le recyclage de la poudre comme mentionnée dans la section 1.1. De plus, ils soulignent que des expérimentations supplémentaires sont nécessaires pour étudier les capacités de dépoudrage de cavités

internes. Sur la base de cette revue de littérature, il semble nécessaire de concevoir et de développer un système à base non liquide pour éliminer la poudre restante. Ce système devrait ainsi être au moins plus efficace que le PRS utilisé seul ou compléter le PRS.

1.3. Objectif et question de recherche

Cet article a pour but de proposer une méthode permettant de dépoudrer des géométries de pièces internes plus efficacement qu'avec le PRS uniquement. En effet, il est actuellement facile de dépoudrer des surfaces externes avec le PRS, ce qui n'est pas le cas pour les surfaces internes telles que les trous. L'étude cherche à analyser le dépoudrage de différentes profondeurs de trous de pièces afin de surmonter les limites actuelles du processus de dépoudrage des pièces par EBM. En outre, cette recherche prend en considération la poudre de titane comme matériau, c'est-à-dire l'alliage Ti-6Al-4V. Compte tenu des contraintes détaillées précédemment (utilisation d'un dispositif à base non liquide), la question de recherche est donc la suivante: comment améliorer le processus de dépoudrage des pièces EBM et comment caractériser les nouvelles performances ainsi obtenues ?

2. CONTEXTE ET DEMARCHE

2.1. Contexte

Après la fabrication EBM et le dépoudrage de pièces, il est généralement nécessaire d'effectuer des opérations de post-traitement pour améliorer les états de surface. Comme procédé de finition, une installation de grenailage par ultrasons (ou USP Ultrasonic Shot Peening) (Fig. 5) améliore fortement l'état de surface des pièces EBM [11].

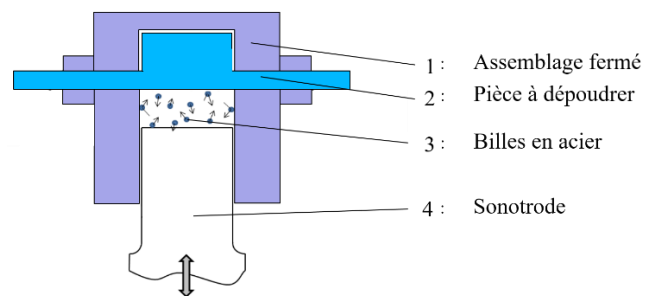


Figure 5 - l'installation de grenailage par ultrasons.

Au cours des travaux de recherche liés à ce processus de finition, il a été observé qu'une certaine quantité de poudre s'échappent des pièces qui n'ont pas été préalablement dépoudrées correctement (Figure 6). Cela conduit à la conclusion que l'USP pourrait contribuer à compléter le processus de dépoudrage initié par le PRS, d'où le sujet de ce travail de recherche.

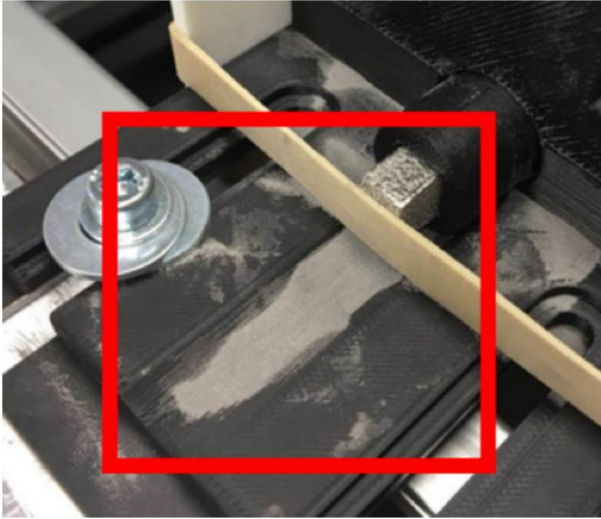


Figure 6 - Poudre s'échappant du dispositif de grenailage par ultrasons.

2.2. Description du dispositif USP

La pièce soumise au grenailage (2) est maintenue par l'ensemble fermé (1) qui empêche les billes d'acier (3) de s'échapper. La sonotrode (4) vibre dans le domaine des ultrasons, 20085 Hz, fréquence par défaut de l'installation de grenailage. Cela permet de mettre en mouvement les billes d'acier et de grenailer l'ensemble de la pièce (2). La projection de la bille sur les surfaces de la pièce avec de la poudre consolidée permet d'enlever la poudre restante. Cependant, ce dispositif ne peut être utilisé tel quel car il n'est pas assez étanche et laisse passer la poudre entre (1) et (2), mais aussi (1) et (4) de l'installation de grenailage (Fig. 5). La poudre de titane étant risquée pour les opérateurs, il est alors nécessaire d'améliorer le système afin d'éviter tout contact avec celle-ci. Un couvercle (5) a été conçu, ainsi qu'un système d'aspiration (6) et un dispositif de récupération de la poudre (7) pour éviter tout risque de projection. La figure 7 présente l'ensemble du dispositif après amélioration. Dans la suite de cet article, ce dispositif sera caractérisé. Pour cela, un protocole expérimental est proposé dans la section suivante (Figure 8).

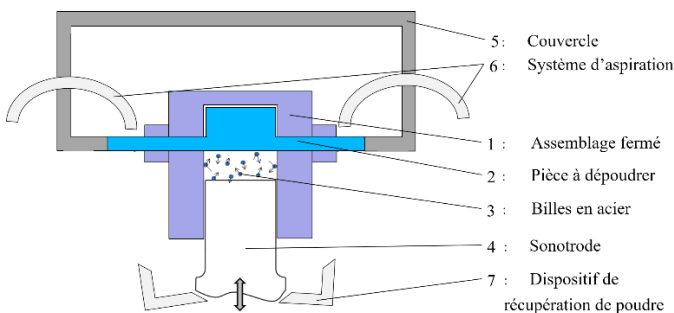


Figure 7 - Ensemble du dispositif expérimental

2.3. Approche

L'approche que nous proposons consiste à identifier pour chaque étape du processus de recherche (illustré en Figure 8) les informations permettant d'identifier des paramètres d'évaluations.

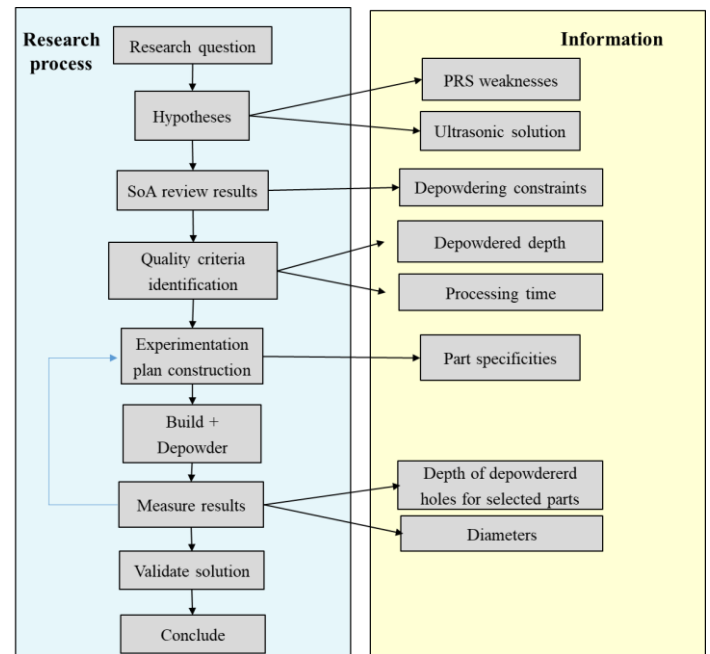


Figure 8 - Méthode de recherche

Après avoir passé en revue l'état de l'art, quelques méthodes de dépowdrage ont montré leurs spécificités et nous ont conduit à lister les critères d'évaluation du dépowdrage, à savoir le rapport "profondeur dépowdrable"/diamètre après dépowdrage ainsi que le temps de traitement. Plusieurs expérimentations sont ainsi préparées afin d'étudier différents types de pièces. Les résultats de dépowdrage complémentaires sont finalement comparés au système PRS classique utilisé seul. La section suivante présente en détail les expérimentations réalisées avec différents échantillons et le système de grenailage par ultrasons, ainsi que leurs résultats.

3. ESSAIS ET RESULTATS

Le "gâteau" contenant les échantillons utilisés dans nos différents essais a été dépowdré à l'aide du PRS. Une attention particulière est portée sur les trous des échantillons qui n'ont volontairement pas été dépowdrés. En effet, l'objectif est de caractériser le processus de dépowdrage de l'USP uniquement (sans PRS) pour le dépowdrage des trous.

3.1. Essais préliminaires

Afin de valider les performances du système USP pour le dépowdrage des pièces EBM, différents échantillons avec des trous traversants sont conçus (Figure 9).

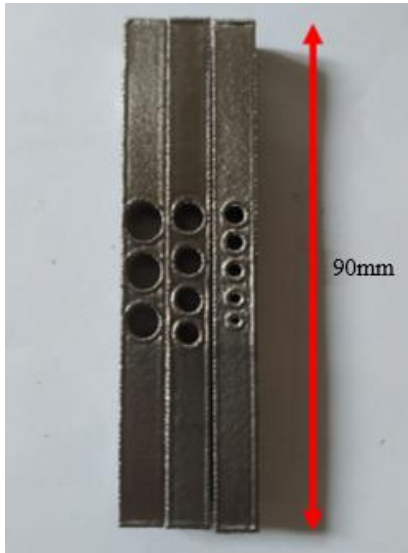


Figure 9 - Échantillons contenant des trous de 1 mm à 6,5 mm de diamètre avec un pas de 0,5 mm.

Les échantillons contiennent des trous d'un diamètre de 1 mm à 6,5 mm avec un pas de 0,5 mm et une profondeur de 7,5 mm. En effet, la largeur maximale de la pièce dans l'installation USP est de 7,5 mm, ce qui nécessite une épaisseur minimale de 0,5 mm de chaque côté des trous. Par conséquent, le diamètre maximal possible des trous est de 6,5 mm. Le but de cette expérience est de vérifier si l'USP est capable d'enlever la poudre consolidée des trous et de déterminer le diamètre minimum des trous qui peuvent être dépoutrés. Les résultats montrent que les trous traversants sont dépoutrés, à l'exception des trous dont le diamètre est compris entre 1 et 2,5 mm ; la raison en est que les diamètres de ces trous sont trop petits pour que les billes de 1 mm puissent s'y loger et enlever la poudre.

3.2. Essais finaux

3.2.1 Conception des échantillons et approche expérimentale

Pour caractériser le processus USP, de nouveaux échantillons sont conçus, avec un diamètre minimum de 3 mm, car les plus petits diamètres ne peuvent pas être dépoutrés. La longueur des échantillons est imposée par la taille de la chambre de construction EBM (200x200x180 mm). Ainsi, les échantillons sont conçus avec des trous verticaux, des diamètres de 3mm à 5 mm (échantillon a.) et de 5.5 mm à 6.5 mm (échantillon b.) et une longueur de 180 mm en raison des contraintes d'espace, (Figure 10).

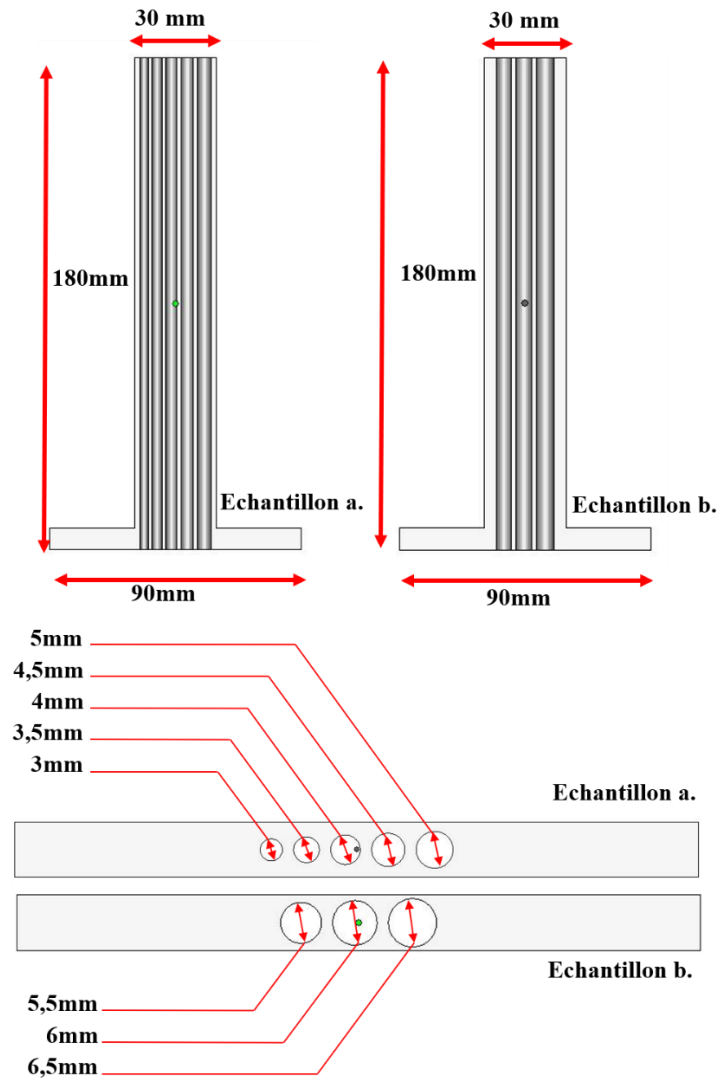


Figure 10 - Échantillons (vue en coupe et vue du dessus)

Tout au long de l'expérience, la profondeur des trous concernés est mesurée avec un calibre toutes les 2 minutes durant l'opération de dépoutrage. A partir du moment où cette profondeur est inférieure à 2 mm, le pas de temps est modifié de 2 à 20 minutes. En effet, les phénomènes de dépoutrage étant logarithmiques, il n'y a plus d'évolution du processus de dépoutrage lorsque la poudre à l'intérieur des trous ne peut plus être enlevée. Pour cette expérimentation, l'opération est arrêtée après 220 minutes.

3.2.2 Résultats expérimentaux

L'évolution de la profondeur de dépoutrage en fonction du temps de dépoutrage est illustrée en Figure 11. Par exemple, il faut 220 minutes pour dépoutrer 124 mm sur 180 mm pour un trou de 6 mm de diamètre et pour dépoutrer 45 mm pour un trou de 3 mm de diamètre. De plus, nous pouvons observer un impact de la position des trous sur les performances de dépoutrage. En effet, le rapport "profondeur dépoutrable"/diamètre devient plus petit pour les trous qui sont situés aux deux extrémités de l'échantillon.

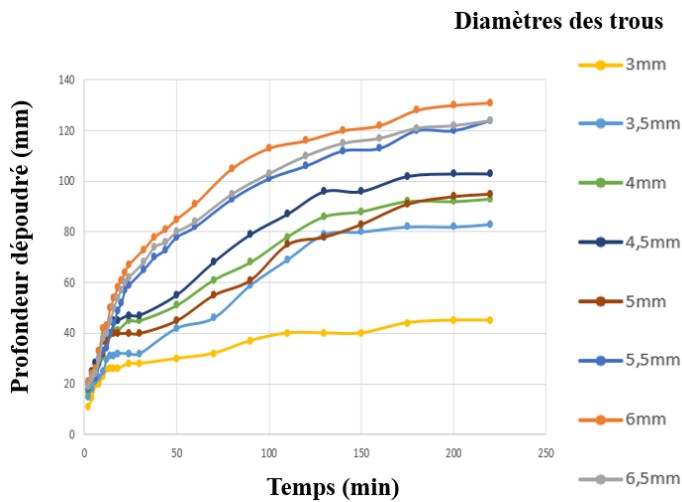


Figure 11 - Trous avec des diamètres allant de 3 à 6.5mm

Cela peut s'expliquer par le fait qu'il y a statistiquement plus de billes qui sont projetées dans les trous proches du centre que dans ceux situés aux extrémités, contribuant ainsi à un meilleur déposé des trous centrés. Dans la Figure 12, la "profondeur maximale de déposé" en fonction de chaque diamètre de trou de nos expériences est représentée. Une régression linéaire est calculée afin de proposer un modèle de prédiction de la "profondeur déposé" des trous droits en fonction de leurs diamètres, et pour des diamètres de trous allant de 3 mm à 6.5 mm.

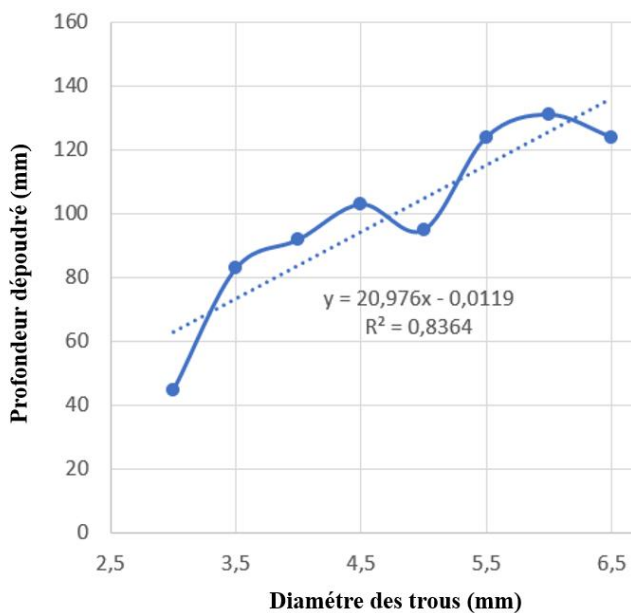


Figure 12 - Profondeur déposé en fonction du diamètre de trous

Cette information pourrait être utilisée lors du processus de conception des pièces EBM afin de s'assurer que les trous des pièces conçues puissent être déposés. La Figure 13 montre la profondeur de déposé en fonction des diamètres des trous. Elle compare les résultats des pièces déposables par PRS [8] avec les pièces déposées par USP. Le rapport "profondeur déposable"/diamètre varie de 2 à 3 pour les pièces

déposées avec le PRS et de 15 à 23 pour les pièces déposées avec l'USP.

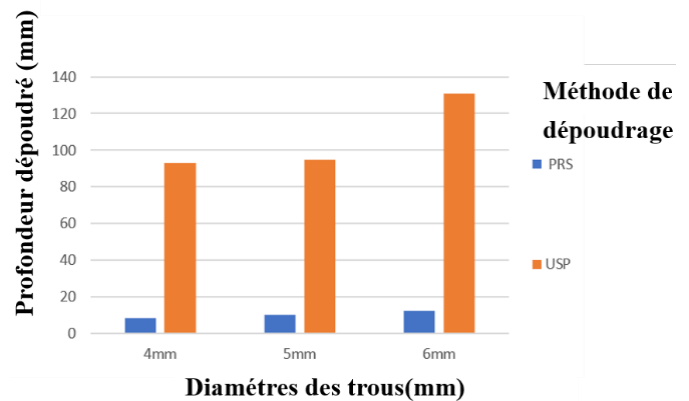


Figure 13 - Comparaison entre les capacités de déposé du PRS et du système USP

4. CONCLUSION

4.1. Contribution

Cette recherche vise à compléter la méthode utilisant le PRS pour le déposé des pièces EBM. Dans un premier temps, la comparaison des différentes solutions de déposé actuellement proposées dans la littérature scientifique a mis en évidence des faiblesses en termes de dispositif de déposé et d'un manque d'études dans le domaine. En se basant sur l'état de l'art effectué, des critères de déposé ont été mis en avant. Ces critères concernent le ratio de déposé ("profondeur déposable"/diamètre), après PRS et USP, ainsi que le temps de traitement pour le déposé. Les échantillons sélectionnés ont un diamètre de 3 mm à 6,5 mm et une longueur de 180 mm. Après le processus de déposé avec le système à ultrasons, la profondeur de la poudre retirée en fonction du temps de déposé est mesurée. Ces expérimentations nous ont permis de proposer un modèle de prédiction de la profondeur de déposé des trous en fonction de leur diamètre. En conclusion, cette méthodologie peut enrichir les recherches actuelles sur les systèmes de déposé PBF et offre des perspectives pour les recherches futures sur des pièces EBM. Ces essais donnent en effet des résultats prometteurs qui mettent en évidence les principaux atouts de cette nouvelle méthode.

4.2. Perspectives

D'un point de vue industriel, l'amélioration du système de déposé de la technologie EBM aura un effet bénéfique important. Par exemple, il pourrait être intéressant de fabriquer des échangeurs de chaleur monoblocs contenant des canaux de refroidissement conformes, ou encore de construire des structures en treillis avec une densité supérieure aux limites mises en évidence par [9]. Pour ce faire, des travaux de recherche supplémentaires seraient nécessaires pour répondre à des besoins tels que la détermination des limites de

dépoudrage pour des pièces de formes internes complexes ou l'extension de la méthode à un dispositif de dépoudrage de plus grandes dimensions. De plus, cette étude a été réalisée en utilisant la fréquence par défaut de l'installation USP. L'étude de la variation de cette fréquence sur les performances de dépoudrage pourrait être étudiée. Enfin, il serait intéressant de tester ce mécanisme de dépoudrage avec des géométries internes plus complexes, par exemple des canaux de refroidissement conformes.

RÉFÉRENCES

- [1] D. Bourell, J. Beaman, M. Leu, D. Rosen, A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead. *Proceedings of RapidTech* 24–25.
- [2] Y. Saadlaoui, J.-L. Milan, J.-M. Rossi, P. Chabrand, Topology optimization and additive manufacturing: Comparison of conception methods using industrial codes, *Journal of Manufacturing Systems*, volume 43, part 1, 2017, pages 178–186 (2017)
- [3] P. Shah, R. Racasan, P. Bills, Comparison of different additive manufacturing methods using computed tomography, *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, Volume 6, Part B, 2016, Pages 69-78, ISSN 2214-6571
- [4] K. Salonitis, S.A. Zarban, Redesign optimization for manufacturing using additive layer techniques, *Procedia CIRP*, Volume 36, 2015, Pages 193-198, ISSN 2212-8271.
- [5] T. Primo, M. Calabrese, A. Del Prete, A. Anglani, Additive manufacturing integration with topology optimization methodology for innovative product design, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 93, 2017, Pages 467–479.
- [6] C. Grandvallet, M. Mbow, T. Mainwaring, F. Pourroy, F. Vignat et al., Eight action rules for the orientation of additive manufacturing parts in powder bed fusion: an industry practice, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. Volume 14, 2020, pages 1–12.
- [7] Electron Beam Melting Machines | EBM Machines | GE Additive, <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/ebm-machines>
- [8] B. Vayre, Conception pour la fabrication additive, application à la technologie EBM, Ph.D. Thesis, Université Grenoble Alpes, Grenoble INP, France, <http://www.theses.fr/s97575> (2014)
- [9] A. Carré, M. Museau, P.-T. Dautre, F. Vignat, A method to determine the depowdered height in lattices manufactured by electron beam melting, *Journal of Manufacturing Process*. Volume 34, Part A, 2018, Pages 1–6.
- [10] A.J. Lopes, L.C. Ramos, D. Saenz, P. Morton, C.A. Terrazas et al., Analysis of powder removal methods for ebm manufactured ti-6al-4v parts, <http://doi.org/10.26153/tsw/17460>
- [11] T. Persenot, A. Burr, E. Plancher, J.-Y. Buffière, R. Dendievel et al., Effect of ultrasonic shot peening on the surface defects of thin struts built by electron beam melting: Consequences on fatigue resistance, *Additive Manufacturing*, volume 28, 2019, pages 821-830, ISSN 2214-8604.