

Mini-revue : Analyse des méthodes de la fabrication additive et identification des défauts lors de la fabrication des métaux.

Date de Publication : 21 février 2022.

Laurien Colinet, Delforge Alexandra, Hoppe Simon, Madani Ziad, Sevello Alice, Demy Philippe
Haute Ecole de la Province de Liège, Département Sciences et Techniques.

Auteur correspondant : Philippe Demy, Haute Ecole de la Province de Liège, Dpt. Ingénieur Industriel, 6 Quai Gloesener, 4021 Liège. philippe.demy@hepl.be

Résumé

L'Additive Manufacturing est une technique de fabrication utilisant notamment des lasers sélectifs et de fusion par faisceaux d'électrons. Ces méthodes permettent de fabriquer des pièces complexes dans le domaine de l'industrie de l'aérospatial ou de la biotechnologie. Les différentes méthodes utilisent toutes un lit de poudre. Ce lit de poudre est ajouté couche par couche et les particules le constituant sont fusionnées. Le laser et le faisceau d'électrons sont utilisés pour faire fondre les poudres et ainsi obtenir une pièce métallique. Malgré que l'Additive Manufacturing offre un bon nombre d'avantages, la technique présente pas mal de défauts, tels que la contrainte résiduelle et les porosités. Certains défauts sont propres à la méthode utilisée comme les fissures pour la méthode de fusion sélective par Laser et les pertes de bords pour la fusion par faisceau d'électrons. Ceux-ci peuvent entraîner des effets catastrophiques sur les propriétés mécaniques des pièces. Il faut donc trouver un moyen de minimiser voire éliminer ces défauts. Les techniques utilisées sont diverses et majoritairement appliquées après la construction de la pièce. Il s'agit soit de méthodes mécaniques comme le sablage, soit chimiques comme la gravure chimique. Il existe également des moyens pour minimiser l'apparition des défauts lors de la création de la pièce, comme chauffer le lit de poudre pour diminuer le gradient de température, mais ces moyens ne sont malheureusement pas les plus efficaces.

Mots-clés : Additive manufacturing, powder bed fusion, impression 3D, défauts, traitements.

Abréviations : AM = Additive Manufacturing ; PBF = Powder Bed Fusion ; SLS = Selective Laser Sintering ; SLM = Selective Laser Melting ; EBM = Electron Beam Melting

1. Introduction

L'« additive manufacturing », aussi connue sous le nom *AM* est un processus permettant de produire des pièces nettes à partir de différents types de matériaux. Ces matériaux peuvent être des polymères, des céramiques ou encore des métaux [1]. Cette méthode de fabrication additive est utilisée en industrie pour construire des pièces très complexes notamment dans le domaine de l'aérospatial ou des prothèses [2]. Certaines pièces indispensables dans ces milieux sont pratiquement inconcevables manuellement ce qui donne une importance capitale à cette méthode de fabrication. Malgré le fait que cette

technologie soit encore assez récente, il existe plusieurs méthodes de fabrication additive, comme le SL (Laser sélectif) ou encore le EBM. Mais peu importe la méthode, certains défauts lors de la création de la pièce apparaissent en nombre non négligeable et ils doivent être éliminés.

Cet article a pour but de faire le point sur les différences entre trois techniques différentes d'AM, essentiellement dans les matériaux métalliques. Ensuite, les causes d'apparition des défauts lors de la fabrication des pièces en

fonction de la méthode utilisée seront évoquées. Enfin, l'article se terminera par une synthèse des différentes méthodes connues pour minimiser la présence et l'apparition des défauts.

2. Méthode générale : Powder Bed Fusion

La fusion sur lit de poudre (PBF) est un processus de fabrication additive qui utilise soit un laser (SLS et SLM) ou soit un faisceau d'électrons (EBM) comme source d'énergie. Ces deux sources vont permettre de fusionner des particules de poudre métallique afin de former une pièce. Voyons en détail ces deux types de méthodes.

2.1. Méthode SL

Il existe deux principales méthodes SL : le frittage sélectif par laser (SLS) et la fusion sélective par laser (SLM). Ces deux méthodes permettent de créer des pièces métalliques à l'aide d'un laser chauffant la poudre. La différence réside dans la fusion des poudres. La méthode SLS ne fond pas les molécules de poudres. Elle les chauffe pour que ces dernières adhèrent entre elles (collage). Par contre, la méthode SLM fait fondre la poudre.

2.1.1. Méthode SLS : Selective Laser Sintering

Il s'agit d'un procédé de fabrication additive qui utilise un laser à haute puissance pour "fritter". Autrement dit, il soumet des pièces métalliques à un frittage pour créer une structure solide [3].

C'est une méthode divisée en plusieurs étapes. Pour commencer, dans une chambre de fabrication, de la poudre est déposée sur une plateforme en fine couche. L'imprimante va préchauffer la poudre à une température un peu inférieure au point de fusion de la matière première. Ainsi, le laser va pouvoir élever plus facilement la température des zones spécifiques du lit de poudre pour avoir la forme du modèle de la pièce recherchée. Le laser va chauffer la poudre en balayant une section, dite transversale, de la forme de la pièce. Par conséquent, cela va fusionner les particules de métal entre elles pour obtenir la pièce métallique sous forme solide. Ensuite, la plateforme s'abaisse couche après couche jusqu'à ce que la pièce soit terminée. Les couches de poudre ont une épaisseur entre 50 et 200 μ [3].

Pour terminer, la pièce est laissée jusqu'à ce qu'elle soit refroidie pour éviter toute déformation. Après cela, elle est nettoyée des excès de poudre qui n'auraient pas fusionnés durant le processus de fabrication.

2.1.2. Méthode SLM : Selective Laser Melting

C'est une méthode qui comporte plusieurs étapes. D'abord, le laser à haute puissance va fusionner des fines particules de métal. Il va être guidé à partir d'un ordinateur, ce qui va donc permettre au laser de suivre un tracé bien déterminé. Ce dernier va donc fondre les particules de métal jusqu'à ce qu'elles ne forment qu'une seule et même particule, c'est-à-dire, qu'elles fusionnent entre elles. Par la suite, une nouvelle couche de poudre va être déposée par une sorte de rouleau, comme indiqué à la *Figure 1* et le laser va de nouveau former une couche. Cela va se reproduire plusieurs fois jusqu'à obtention de la pièce métallique souhaitée. Lorsque c'est terminé, il faut attendre que la pièce métallique soit refroidie pour pouvoir l'enlever du baquet de poudre. Cela évite d'éventuelles déformations de la pièce. Pour terminer, la pièce est nettoyée pour retirer tous les restes de particules de poudre qui n'auraient pas fusionnés [4].

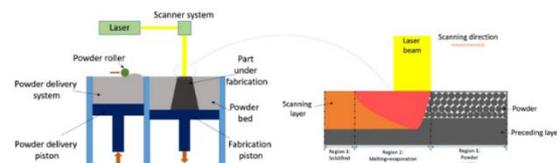


Figure 1 : Illustration schématique de la méthode SLM [4].

Par exemple dans le cas d'un alliage de titane Ti-6Al-4V, il y a création d'une structure martensitique ce qui augmente nettement la résistance à la fatigue [2].

2.3. Méthode EBM : Electron Beam Melting

C'est la fusion par faisceau d'électron. Cette méthode de fabrication additive utilise un faisceau d'électrons de haute énergie afin de fondre la poudre métallique. Cette technique a été notamment développée en utilisant une autre méthode. Elle est appelée microscopie électronique à balayage (SEM). Cette dernière utilise un fin faisceau d'électrons émis par un canon à électrons et des lentilles

électromagnétiques permettant de focaliser le faisceau d'électrons sur l'échantillon [5].

Pour l'EBM, on passe par plusieurs étapes. D'abord, on focalise le faisceau d'électrons par le système de lentilles électromagnétiques puis, une trémie à poudre verse celle-ci sur le côté de la plate-forme et enfin une couche de poudre est enduite par un râteau sur le dessus de la couche préalablement fondue (voir *Figure 2*).

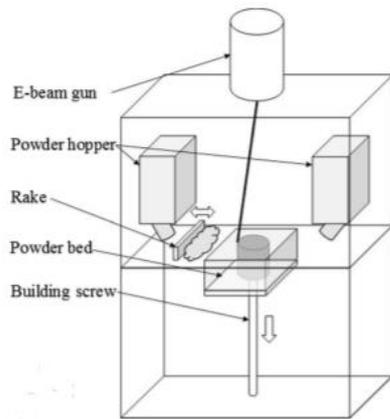


Figure 2 : Schématisation des composants de la méthode EBM [5].

3. Identification des défauts

Même si les méthodes de production sont différentes, elles ont un point commun : les défauts de fabrication. Bien que chaque méthode n'engendre pas toujours les mêmes défauts lors de la fabrication que les autres, il y en a certains qui sont récurrents comme l'apparition de porosités ou les contraintes résiduelles.

3.1. Défauts généraux

3.1.1. Porosités

Les porosités sont des défauts qui se retrouvent dans toutes les méthodes de fabrication des métaux par fabrication additive. Il s'agit d'un vide sphérique microscopique, aux alentours de 100µm (voir *Figure 3*), fermés sous la surface de la pièce. Le niveau de porosité par pièce est de 1% à 5% et ils peuvent provoquer des défaillances catastrophiques [1]. Il existe deux types de pores : les pores de formes irrégulières et les sphériques. Les premiers sont ceux formés par un manque de métal fondu remplissant l'espace. Les autres sont formés par le gaz entraîné dans la poudre.

Les pores de formes irrégulières peuvent être créés lorsque l'apport de chaleur n'est pas

suffisant, ce qui conduit à une fusion incomplète. La fusion incomplète est causée par un mauvais choix des paramètres de traitement. La taille des pores dépend également de ces paramètres.

Ceux de formes régulières se forment lorsque les gaz présents dans le bassin de fusion sont piégés lors de taux de refroidissement élevés. Ces gaz sont formés et piégés soit à partir de trous présents dans le lit de poudre, soit lors de l'évaporation de la poudre (évaporation des constituants à point de fusion inférieur dans le matériau en poudre). Plus la trajectoire de balayage du laser est longue et grande, plus les porosités ont du temps pour se développer.

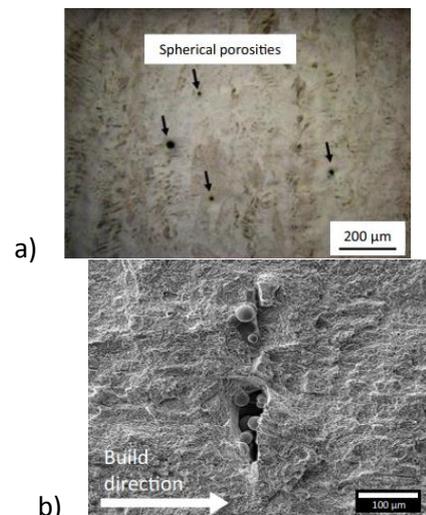


Figure 3 : Exemple de porosités : a = porosités ; b = fusion incomplète [7].

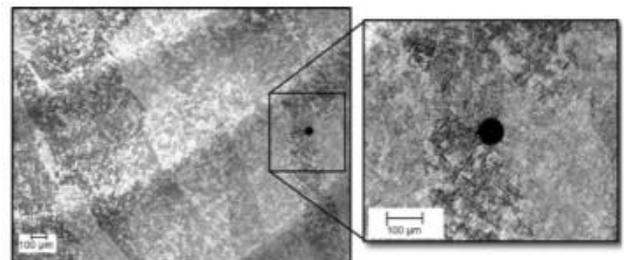


Figure 4 : Apparition de porosités dans le Ti-6Al-4V [6].

A la *Figure 4*, il est possible de voir que des porosités apparaissent dans le Ti-6Al-4V lors de sa conception. Bien que sa résistance à la fatigue soit améliorée (voir ci-dessus), des porosités sont toujours présentes et diminuent ses propriétés. Mais l'avantage de ce titane est qu'il devient très dense, il possède seulement 0,3% de porosités. C'est cette densité qui le rend très utile dans l'aérospatial [2].

3.1.2. Contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles sont présentes dans la plupart des pièces manufacturées et ce sont des problèmes critiques dans l'industrie. Il s'agit de contraintes que subit le matériau lorsqu'il n'est soumis à aucune contrainte extérieure. Elles se forment durant le processus de fabrication à cause des gradients thermiques élevés et des vitesses de refroidissement rapides à l'intérieur du lit de poudre ce qui soumet la pièce à des contractions rapides comme présenté à la *Figure 5*. Placé la pièce dans un fourneau chauffé à 600°C pendant une heure permet de soulager ces contraintes [1].

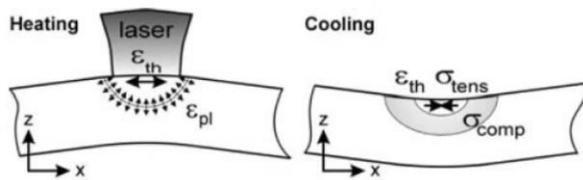


Figure 5 : Contraintes présentes dans des pièces (TGM) [10].

3.2. Défaut particulier dans le SLM

Dans le SLM, le principal défaut est la formation de fissures [7]. Pour assurer un taux de refroidissement élevé, un taux de balayage important peut provoquer l'instabilité de la piscine de fonte. Le refroidissement rapide fait donc que les fissures sont facilement générées. Le traitement thermique au laser peut réduire le gradient thermique entre le matériau fondu et le matériau solidifié de sorte qu'il puisse favoriser la libération de contraintes.

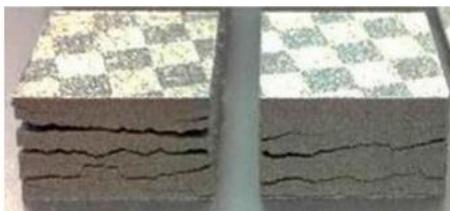


Figure 6 : Exemples de fissures [8].

3.3. Défaut particulier dans l'EBM

Des défauts typiques de la méthode EBM sont les défauts géométriques et dimensionnels ainsi que d'état de surface. Un de ces défauts est la "perte de bords" [9]. Il s'agit d'une rétraction de la matière tout au long des bords de pièces possédant des volumes en surplomb suite au dépôt successif des couches fusionnées sur la poudre consolidée. A la *Figure 7*, il est possible

de voir que des pertes de bords apparaissent dans des coins, entraînant des variations d'épaisseurs à d'autres endroits de la pièce.

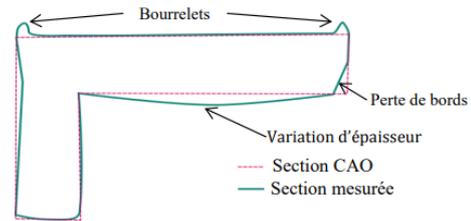


Figure 7 : Schématisation des défauts géométriques d'une pièce [9].

4. Elimination des défauts

Une méthode pour éliminer les fissures est le double balayage. Cette méthode permet de réduire les fissures en comblant efficacement les vides générés par la fusion partielle des poudres. Une autre méthode consiste à ajouter une deuxième particule [10].

En réalité, il est impossible d'éliminer complètement les défauts d'une pièce mais il existe des méthodes pour les minimiser. Il existe deux grandes catégories : les paramètres de traitement ou bien les post-traitements.

4.1. Paramètres de traitements

Les paramètres de traitement sont les parties ou paramètres modifiables lors de la construction de la pièce. Cela peut être la puissance du laser, l'épaisseur de la couche de poudre ou encore la vitesse de balayage [8]. Si la puissance du laser est trop importante, cela peut entraîner des surfusions. A l'inverse, si le laser n'est pas assez puissant, les molécules de poudre peuvent ne pas bien fusionner. Il faut donc régler ces paramètres de manière optimale afin de réduire l'apparition de défauts.

4.2. Les post-traitements

Les post-traitements sont les traitements qu'il est possible de réaliser après la production de la pièce.

Ils sont utiles pour éliminer les défauts résiduels. Par exemple, le sablage, qui consiste à la projection d'abrasif sur un corps, est utilisé pour le traitement des surfaces mécaniques. Il existe également des méthodes chimiques et physiques pour limiter les défauts de surface : la gravure chimique et la pulvérisation thermique [8]. Ces

procédés permettent de “polir” les surfaces comme il est montré sur la *Figure 8*.

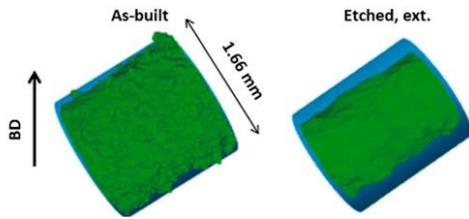


Figure 8 : Visualisation des conséquences de la gravure chimique [8].

Il existe une méthode pour éliminer les pores : la haute pression isostatique. Cette méthode ne peut malheureusement pas fermer toutes les surfaces de pores et certains pores fermés peuvent même se rouvrir. Une méthode plus efficace peut se faire à l'aide des forces thermo capillaires présentées à la *Figure 9* [11]. Premièrement, il faut que le gradient de température dans le domaine d'interaction du laser soit suffisamment élevé pour surmonter la force de traînée induite par l'écoulement de la matière fondue. Deuxièmement, la zone de la région à fort gradient de température élevé doit être raisonnablement large pour avoir une bonne occasion de rencontrer des pores [11]. Il a été démontré qu'un laser de 70 micromètres de diamètre avec une distance de 120 micromètres entre chaque hachure minimise les pores [1].

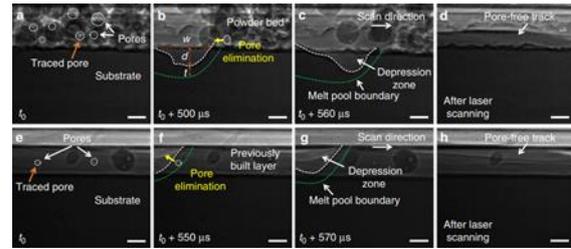


Figure 9 : Réduction des pores présents dans la pièce grâce aux forces thermo capillaires [11]

5. Conclusion

Cet article de synthèse permet de prendre conscience que bien qu'il y ait plusieurs méthodes d'AM, elles ne diffèrent pas énormément. Le principe est le même : projeter une source d'énergie qui va provoquer le réchauffement du lit de poudre et ainsi entraîner ou non sa fusion. Les différences majeures résident dans les défauts. Il existe des défauts généraux présents dans chaque pièce construite, peu importe la méthode utilisée tels que les contraintes résiduelles et les porosités. Par contre, certains défauts peuvent être propres à une technique. C'est le cas pour les fissures ou les pertes de bords. Malgré ces défauts, il existe des méthodes pour minimiser leur quantité et leur impact comme la gravure chimique, les forces thermo-capillaires ou encore la haute pression isostatique. Cependant, ne faudrait-il pas chercher des méthodes de fabrication similaires mais améliorées dans le but d'éviter toute formation de défauts lors de la création de la pièce ?

6. Références

- [1] : **Kim FH, Moylan SP.** Literature review of metal additive manufacturing defects . Gaithersburg, MD : National Institute of Standards and Technology; 2018 mai [cité 21 déc 2021] p. NIST AMS 100-16. Report No. : NIST AMS 100-16. <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ams/NIST.AMS.100-16.pdf>
- [2] : **Knowles CR, Becker TH, Tait RB.** RESIDUAL STRESS MEASUREMENTS AND STRUCTURAL INTEGRITY IMPLICATIONS FOR SELECTIVE LASER MELTED TI-6AL-4V. The South African Journal of Industrial Engineering. 3 déc 2012 ;23(3) :119- 29.
- [3] : **Formlabs** Guide d'impression 3D à frittage sélectif par laser (SLS). Formlabs. [Cité 21 déc 2021]. <https://formlabs.com/fr/blog/introduction-impression-3d-frittage-laser-selectif-sls/>
- [4] : **Peyman Ansari, Metin U. Salamci** On the selective laser melting based additive manufacturing of AlSi10Mg_ The process parameter investigation through multiphysics simulation and experimental validation | Elsevier Enhanced Reader. [cité 21 déc 2021]. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0925838821032825?token=89F707BAEC7EF6347C898D4E187C81270B7AD471C10455AE8609FE0089125032859666405C8287BBE1EB690EA4325276&originRegion=eu-west-1&originCreation=20211221082709>
- [5] : **Zhang Y, Wu L, Guo X, Kane S, Deng Y, Jung Y-G, et al.** Additive Manufacturing of Metallic Materials : A Review. J of Materi Eng and Perform. 1 janv 2018 ;27(1) :1- 13. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-017-2747-y>
- [6] : **Brennan MC, Keist JS, Palmer TA.** Defects in Metal Additive Manufacturing Processes. J of Materi Eng and Perform. 1 juill 2021;30(7):4808- 1 <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11665-021-05919-6>
- [7] : **Mercelis, P. & Kruth, J.P.** 2006. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting, Rapid Prototyping Journal, 12(5), pp. 254–265.
- [8] : **Echeta I, Feng X, Dutton B, Leach R, Piano S.** Review of defects in lattice structures manufactured by powder bed fusion. Int J Adv Manuf Technol. janv 2020 ;106(56) :264968. <http://link.springer.com/10.1007/s00170-019-04753-4>
- [9] : **Ghaoui S, Ledoux Y, Ballu A, Kusiak A, Museau M, Villeneuve F.** Simulation thermomécanique de l'apparition des défauts géométriques sur des pièces produites en fabrication additive EBM. 2019 ;9. <https://cfm2019.sciencesconf.org/255190/document>
- [10] : **Zhang P, Tan J, Tian Y, Yan H, Yu Z.** Research progress on selective laser melting (SLM) of bulk metallic glasses (BMGs): a review. Int J Adv Manuf Technol [Internet]. 26 sept 2021 [cité 24 nov 2021] ; <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07990-8>
- [11] : **Hojjatzadeh SMH, Parab ND, Yan W, Guo Q, Xiong L, Zhao C, et al.** Pore elimination mechanisms during 3D printing of metals. Nat Commun. 12 juill 2019 ;10(1) :3088. <https://www.nature.com/articles/s41467-019-10973-9>