

Détection des Porosités en Fabrication Additive Métallique

Une Nouvelle Approche pour la Technologie EBM

Alexandre Piaget - Matthieu Museau - Henri Paris

Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP¹, G-SCOP, F-38000 Grenoble, France
alexandre.piaget@g-scop.grenoble-inp.fr

Résumé

La Fabrication Additive Métallique par Electron Beam Melting (EBM) devient, depuis sa création, un outil de plus en plus utilisé dans le monde industriel. Les pièces réalisées par cette technologie doivent cependant être qualifiées pour s'assurer de leurs caractéristiques avant d'être utilisées. La présence de porosité dans la matière représente un risque important pour la santé des pièces. Dans un premier temps, nous nous intéressons aux technologies qui permettent le contrôle de la bonne santé des pièces de manière non destructive. Les avantages et limites de ces technologies sont présentés et étudiés. Dans un second temps, connaissant les limites des autres moyens de détection de porosité et la technologie EBM, un nouvel outil de détection de la porosité dédié à l'EBM est présenté. L'approche stratégique, le principe d'expérimentation et les premiers résultats sont exposés. Les limites et perspectives d'améliorations de l'outil sont également explicitées.

Abstract

Additive Manufacturing of metal parts using Electron Beam Melting becomes increasingly used in the industrial world. However, parts made with this technology must be qualified before using in order to guarantee their properties. The presence of porosity in the material constitutes a major risk for the material health. First technologies able to control the material health of parts with a nondestructive tool are presented. Strengths and weaknesses of these technologies are explained and studied. Then, as the limits of the ways to detect porosity and the EBM technology are known, a new tool for the porosity detection is proposed. The strategic approach, the experimentation and the first results are presented. The limits and the improving prospects for the tool are also presented.

Mots-clés : Maîtrise de la Qualité, Fabrication Additive, Electron Beam Melting, Détection de Porosité, Contrôle Non Destructif

¹ Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes

1. Introduction

1.1. La technologie Electron Beam Melting

La technologie Electron Beam Melting (EBM) est une technologie dite « lit de poudre » qui permet la transformation de poudre métallique en pièce dense grâce à l'énergie apportée par le faisceau d'électron. La machine Arcam A1 (figure 1) de la société Arcam permet de fabriquer des pièces incluses dans une boîte de 195mm de côté et 180mm de hauteur [1]. Cette machine permet l'obtention de pièces complexes (treillis, matériaux architecturés, ...) qui peuvent être difficiles à contrôler.

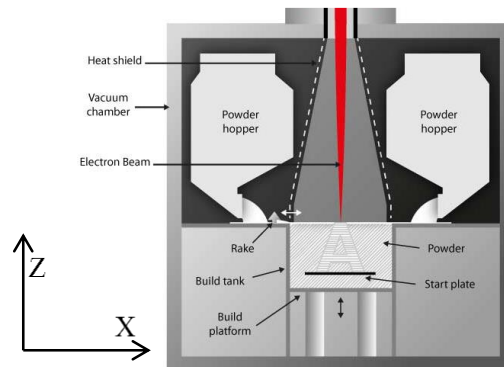


Figure 1 : Représentation de la machine A1 [1]

Pour chaque couche, le faisceau d'électron répète un schéma précis et nécessaire au bon fonctionnement de la fabrication. Ainsi, la première étape consiste à consolider l'intégralité de la surface de la poudre en vue de la rendre solide et d'augmenter sa conductivité thermique et électrique [2]. La chaleur est ainsi mieux répartie, l'énergie du faisceau d'électron mieux distribuée et l'ensemble du lit de poudre est rendu solide afin de ne pas être influencé par le mouvement du râteau déposant la poudre des couches à venir.

Ensuite, le faisceau d'électron fond localement la poudre avec des paramètres dégradés pour créer les supports.

Puis, le faisceau fond localement la poudre pour créer la géométrie désirée. Cette opération se passe en deux temps. Le faisceau fond en premier les contours de la surface à fondre, puis il parcourt l'intégralité de la surface par balayage orienté alternativement (d'une couche à l'autre) selon les deux directions du plan de fusion (figure 2). Ainsi, une couche dont la hauteur vaut 0 modulo $100\mu\text{m}$ est appelée paire. Elle est impaire dans le cas contraire (vaut $50\mu\text{m}$ modulo $100\mu\text{m}$). Le balayage du faisceau se fait sur l'intégralité de l'espace de fabrication et non pas pièce par pièce. Ainsi, si plusieurs pièces sont alignées, il balayera ces pièces simultanément. Est appelée ligne de fusion la trajectoire rectiligne faite par le faisceau d'électron entre deux retournements de faisceau (en vert sur la figure 2). Une seule ligne peut donc chevaucher parcourir plusieurs pièces.

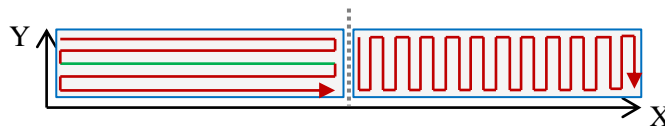


Figure 2 : Schéma de passage du faisceau entre les couches paires (gauche) et impaires (droite)

Le plateau descend ensuite de $50\mu\text{m}$ et le râteau répartit une nouvelle couche de poudre libre au-dessus. Le processus se répète ainsi couche par couche jusqu'à l'obtention des pièces.

1.2. Les porosités

Est appelée porosité la présence non souhaitée d'un corps étranger dans une géométrie fermée. De manière générale et particulièrement dans cette étude, nous distinguons deux catégories de porosités.

La première catégorie de porosité est celle naturellement présente dans la poudre [3]. Elle est issue du procédé d'obtention des poudres (atomisation au gaz) et contient donc des bulles d'argon. La figure 3 montre les inclusions de gaz présentes dans quelques grains de poudre.

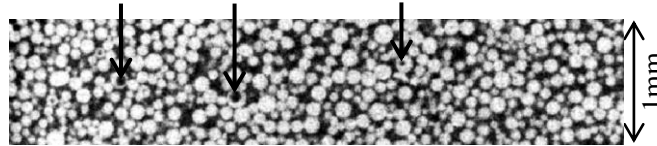


Figure 3 : Visualisation de la poudre consolidée (TI-6AL-4V) par tomographie à rayons X

La seconde catégorie de porosité est celle créée lors de la fabrication. Elle est générée lorsque les conditions énergétiques ne sont pas suffisantes pour assurer la fusion de l'intégralité de la poudre. Nous avons pu observer qu'il était difficile de fondre, en continu, une ligne comportant plus de 96mm de matière (pour du Ti-6Al-4V avec la machine Arcam A1) avec des paramètres optimaux. Le couple intensité du faisceau et vitesse du faisceau atteint sa limite et l'apport énergétique devient insuffisant. Cela a pour effet de fabriquer des surfaces poreuses comme présentées sur la figure 4.

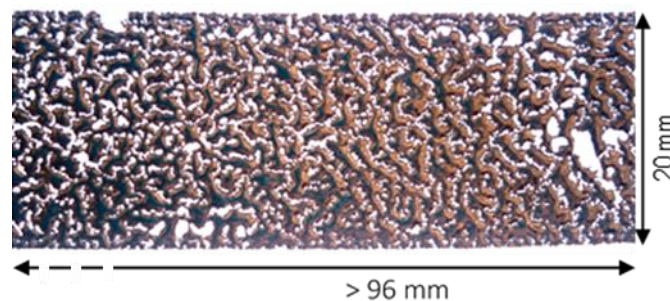


Figure 4 : Photo d'une plaque monocouche poreuse

Dans cette étude, nous nous intéressons davantage à la seconde catégorie de porosité qui est moins prévisible et plus dangereuse pour la qualité des pièces. En effet, les porosités de seconde catégorie sont moins sphériques et ont donc un impact plus important sur les caractéristiques de la pièce [4] [5].

Lorsque la couche n est fabriquée, la couche $n-1$ est en partie refondue [6]. Cela peut engendrer la disparition partielle ou complète des potentielles porosités de la couche $n-1$. La figure 4 présente les défauts de fusion d'une couche qui est balayée dans sa plus grande longueur. Comme la couche suivante est balayée dans l'autre sens, les défauts ne sont plus visibles et sont en partie atténués. Les défauts (porosités) restants sont ensuite au sein de la matière.

Dans l'industrie, les pièces subissent souvent un traitement thermique de type Compression Isostatique à Chaud (CIC). Ce traitement thermique permet de réduire la taille (voire de supprimer) les porosités qui ne sont pas ouvertes sur l'extérieur. Il a cependant un impact sur la microstructure et le volume final des pièces. Pour que ce traitement soit efficace, il est nécessaire de bien maîtriser le taux de porosité [7].

La détection de porosité dans les pièces réalisées par EBM est donc essentielle. La problématique porte sur la détection et quantification des porosités de seconde catégorie en temps réduit, avec un faible coût et sans impacter la pièce. La partie 2 montre que les solutions technologiques actuellement utilisées

ne le permettent pas. Nous proposons donc, dans la partie 3, une autre solution technologique capable de répondre à cette problématique.

2. Détection de porosité et technologies existantes

Faire la différence entre les porosités de première et seconde catégorie est primordial pour la qualité des pièces [4]. Ainsi, les moyens de contrôle doivent être précis et permettre cette distinction.

Des solutions technologiques existent pour identifier la présence d'un corps étranger ou l'absence de matière dans une pièce de manière non destructive. Cette partie présente les technologies déjà utilisées et détaille leurs limites dans un contexte industriel. Ces solutions sont caractérisées et critiquées selon le triptyque coût-qualité-délai propre à l'industrie.

2.1. Ultrasons

Les ultrasons permettent de détecter l'absence de continuité dans un corps dense. Leur utilisation permet donc d'observer la présence de porosité dans les pièces issues de la fabrication additive. Avec une technologie adaptée, il est même possible de caractériser la localisation et la taille de la porosité [9].

Pendant, en sortie de machine, la rugosité des pièces ne permet pas de réaliser ce contrôle dans de bonnes conditions [9]. Il faut donc réaliser un usinage afin de rendre la pièce apte à son contrôle. Cette étape préliminaire a un coût et peut s'avérer contraignante si elle n'est pas nécessaire à la pièce finale. En outre, ajouter de la valeur à une pièce qui est plus tard assimilée à de la non qualité représente une perte supplémentaire. Enfin, il faut utiliser un appareil de grande précision et réaliser une analyse poussée afin d'obtenir une distinction des porosités induites par la fabrication (non-sphériques) des porosités de première catégorie (sphériques) [4].

2.2. Tomographie à rayons X

La tomographie à rayons X permet de détecter avec précision l'absence de matière ou la présence d'un corps de densité différente à l'intérieur de la matière [10]. Il est possible, grâce à cet outil, de reconstituer la morphologie de la pièce et de distinguer les corps qui la composent. Ainsi (voir figure 5) sont rendues possible la détection de la présence des porosités et la mesure de leur taille et de leurs impacts sur les caractéristiques de la pièce finale.

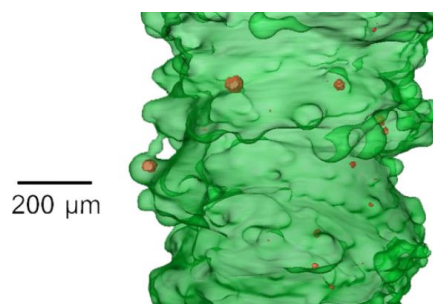


Figure 5 : Reconstitution par tomographie d'une poutre nominale de Ø1mm fabriquée par EBM [11]

La figure 5 montre un cylindre fabriqué par la technologie EBM. Les porosités fermées sont visibles en rouge sur la figure. Leur morphologie sphérique indique qu'il s'agit de porosité de première catégorie [11].

La tomographie à rayons X présente l'avantage de permettre la distinction entre les porosités de première et seconde catégorie. En revanche, ce contrôle est coûteux et ne permet pas de contrôler toutes les pièces. Ainsi, les pièces de grandes dimensions nécessitent une série d'analyses. Le manque de

puissance des rayons peut aussi rendre les parties épaisses opaques [10]. En outre, pour avoir un résultat précis, il faut un long temps d'acquisition. Cette solution offre un résultat idéal mais n'est adaptée qu'au très petites séries et elle engendre un surcoût important.

2.3. Mesure in situ

Implémenter une machine d'outils de mesure in Situ est une solution proposée par Arcam (modèle Q20 par exemple) [13]. La machine utilisée dans l'étude ne dispose cependant pas de ces outils. Cette implémentation consiste à garder une trace de chaque couche par une photo. Associées à un traitement d'image approprié, ces photos peuvent permettre la détection de poudres non fondues sur une couche donnée. Il est ainsi possible d'identifier une couche présentant un danger et la potentielle présence de poudre partiellement voire non fondue.

Cette solution présente l'avantage de pouvoir contrôler toutes les pièces fabriquées dans le même espace de fabrication en une seule fois [12].

Ce choix technologique demande des dispositions spécifiques pour stocker la grande quantité d'image et un traitement d'image robuste pour avoir une analyse efficace. Il présente également un point de faiblesse. En effet, les images de chaque couche sont représentatives de l'espace de fabrication à un moment donné mais ne représentent pas les pièces finales. Cela a été explicité dans la partie I : la fabrication d'une couche refond en partie la couche inférieure. Cela peut alors fausser les résultats et laisser penser qu'une pièce correcte est défectueuse.

2.4. Calcul de densité

La méthode suivante utilise la poussée d'Archimède et une balance de précision pour calculer le volume et le poids d'une pièce. A partir de ces données, la densité est calculée et rapportée aux références pour calculer le taux de porosité. Cette solution permet de comparer la densité des pièces fabriquées à celle des poudres. Comme la variation de densité due aux porosités de première catégorie est déjà incluse dans la densité des poudres, une différence de densité est une marque de porosité de seconde catégorie.

Comparée aux autres solutions, celle-ci présente l'avantage d'être rapide et peu chère. En revanche, cette solution n'apporte pas d'information sur la taille, la répartition, la localisation ou la forme des porosités créées. Elle demande en outre des instruments de grande précision pour avoir une information adéquate.

Toutes ces technologies présentent des avantages et des inconvénients propres. Dans notre réflexion, nous avons cherché à intégrer la connaissance de la machine et de l'apparition des porosités de seconde catégorie pour créer un outil dédié à la caractérisation plus spécifique mais également plus simple à mettre en œuvre.

3. Création d'un outil dédié à la détection de porosité

3.1. Stratégie

Lorsqu'une pièce de grande dimension est fabriquée ou que l'espace de fabrication contient un grand nombre de pièces, il se peut que les longueurs de lignes fabriquées dépassent la valeur de 96mm. Dans cette situation, les porosités de seconde catégorie peuvent apparaître.

Afin de contrôler la qualité de la fusion, nous cherchons à obtenir des informations sur la fusion dans les zones à risque. Pour cela, nous voulons reproduire les conditions de fusion sur un élément témoin. Ce témoin et l'analyse portée sur lui composent notre outil dédié à la détection de porosité.

Sachant que le balayage du faisceau d'électron se fait sur l'intégralité des pièces et non sur les pièces individuellement, deux pièces alignées selon un des axes de balayages auront les mêmes conditions de fusion (lors du balayage selon cet axe). C'est ce phénomène que nous utilisons pour avoir les mêmes conditions de fusion dans la pièce à contrôler et dans notre témoin qui seront alignés selon l'axe de balayage critique. Dans cette étude, l'axe de balayage critique sera toujours X.

Ce phénomène permet de dégager deux méthodes de contrôle différentes. Ainsi, une méthode de contrôle visuel est proposée dans un premier temps. Puis, une seconde approche par tomographie est étudiée.

3.2. Approche par contrôle visuel

L'objectif est de faire apparaître visuellement les conditions de fusion sur le témoin. Ainsi, un contrôle visuel doit permettre de valider la bonne qualité de fusion de la pièce. Avec la technologie EBM, les surfaces supérieures présentent un aspect visuel marqué par la fusion continue de la matière sur les lignes lorsque la fabrication se passe normalement. En revanche, lorsqu'il y a un manque de puissance, cet aspect visuel de surface est dégradé. Les grains non fondus sont éliminés de la couche supérieure et laissent leur empreinte sur la surface. Des discontinuités sur les lignes sont alors observées. Notre concept utilise cette conséquence pour tracer le défaut.

3.2.1. Principe

Pour réaliser cette étude et dans le but de caractériser notre outil, nous cherchons à contrôler une pièce simple de forme parallélépipédique de dimensions 20mm selon Y, 3mm selon et de longueur variable selon X. Au-delà de 96mm de longueur (toutes pièces confondues), l'apport d'énergie sur la ligne de fusion n'est plus correctement piloté et risque d'être insuffisant. En incorporant le témoin proposé et en faisant varier la longueur de la pièce à contrôler, il est possible de vérifier que celui-ci présente des défauts en adéquation avec la qualité de la fusion des lignes. Par exemple, en dessous de 96mm de longueur totale de fusion, il ne doit pas y avoir de défaut.

L'outil proposé se compose dans cette partie de deux témoins identiques. Un témoin est un parallélépipède rectangle (de dimensions 20mm selon X, 20mm selon Y et 2mm selon Z) et dont le défaut sera apparent sur la surface supérieure. Des surfaces latérales de 2mm de largeur sont ajoutées à la géométrie, elles sont éloignées de la surface centrale pour s'affranchir des effets de bord (retournement du faisceau lors du balayage, etc.). La figure 6 montre la conception d'un témoin.

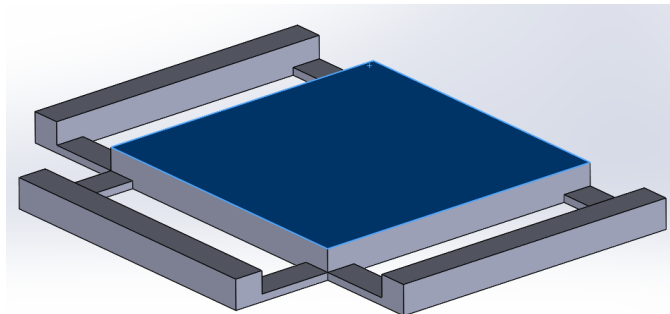


Figure 6 : Représentation numérique d'un témoin (surface de contrôle en bleu)

La détérioration qui apparaît à la surface d'un témoin est visible à l'œil mais peut être également traitée numériquement. Le moyen mis en place dans cette étude est une analyse optique avec une lumière rasante qui permet de mettre en avant le relief de la surface. L'image obtenue montre des sillons entre les passages du faisceau d'électron et lorsqu'une poudre n'a pas été fondue par manque d'apport en énergie,

elle laisse son empreinte sur la surface. Cela se traduit par une forme non rectiligne sur l'image comme observable sur la figure 7.

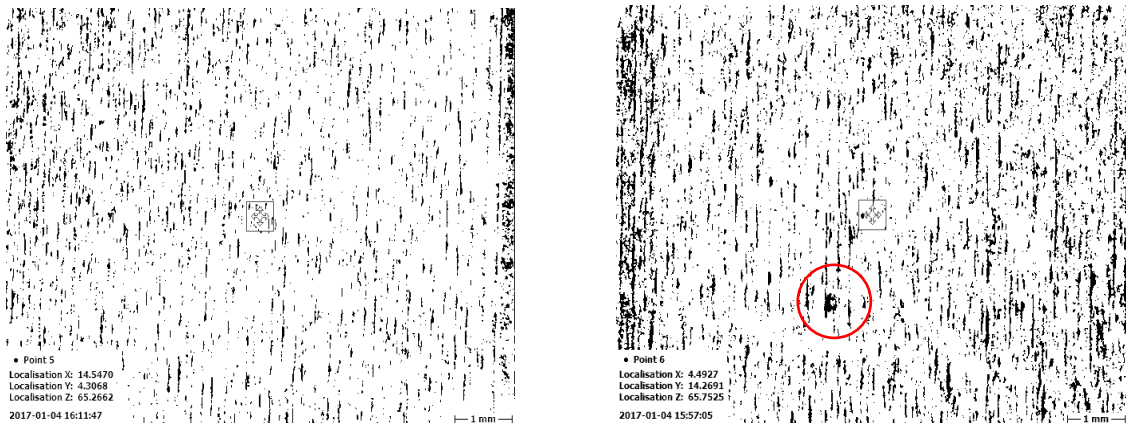


Figure 7 : Exemple de surface classique (à gauche) et de surface comprenant un défaut (à droite)

3.2.2. Expérimentation

Afin de vérifier la corrélation entre la qualité de fusion et l'aspect visuel de la surface de notre outil, des séries de tests avec différentes longueurs de pièce sont effectuées. En faisant ainsi, nous visons à trouver la longueur de fusion à partir de laquelle la surface d'un témoin montre une détérioration visible. Par la suite, nous appellerons L_t (présence du défaut sur le témoin) cette longueur. Idéalement, L_t doit être proche de 96mm.

Dans un second temps, et une fois L_t déterminée, il faut vérifier la corrélation entre qualité de la fusion dans la pièce à contrôler et le contrôle visuel du témoin. En effet, puisque les couches sont refondues, une couche qui présente une mauvaise qualité à un moment donné peut être corrigée a posteriori. Nous vérifions cette corrélation en analysant la pièce par tomographie. Il est alors possible de déterminer la longueur, que nous appellerons L_p , à partir de laquelle le défaut est réellement présent dans la pièce. La différence entre L_p et L_t détermine la précision de l'outil proposé dans sa configuration actuelle et montre également l'influence de la compensation due à la fusion de la couche supérieure.

Le plan d'expérience qui permet de déterminer L_p est en deux temps. Nous regardons d'abord l'impact de la longueur sur une plage très étendue (de 96mm jusqu'à 160mm). Les longueurs testées sont : 96, 106, 116, 130 et 160mm. On raisonne par dichotomie pour trouver l'intervalle qui contient L_p . Selon les résultats de cette première analyse, nous cherchons à affiner le résultat dans l'intervalle trouvé en fabriquant toutes les longueurs (bornes incluses) avec un pas de 2mm entre chaque longueur. Il est donc possible de déterminer l'intervalle de 2mm contenant L_p . Nous connaissons ainsi avec une précision de ± 1 mm la valeur de L_p .

Dans le cas où nous observons une différence notable entre L_p et L_t , et dans la mesure où L_t est plus petit que L_p , une caractérisation précise de l'aspect visuel du témoin sera mise en place. De cette manière, nous pouvons déterminer si un seuil de détérioration de l'aspect visuel peut correspondre à la longueur L_p et donc si, au-delà de ce seuil, il y a des porosités dans la pièce.

La pièce à contrôler est placée dans l'espace de fabrication de sorte que sa longueur soit dans un axe de fabrication. Les témoins sont ensuite ajoutés en alignement avec la pièce testée dans le plan XY. La figure 8a illustre cette disposition. La position en Z est choisie pour que la dernière couche des témoins soit réalisée pendant la fabrication de la zone critique de fabrication de la pièce. Dans notre cas, les couches sont toutes identiques et critiques, les témoins sont donc positionnés pour contrôler la couche moyenne de notre pièce.

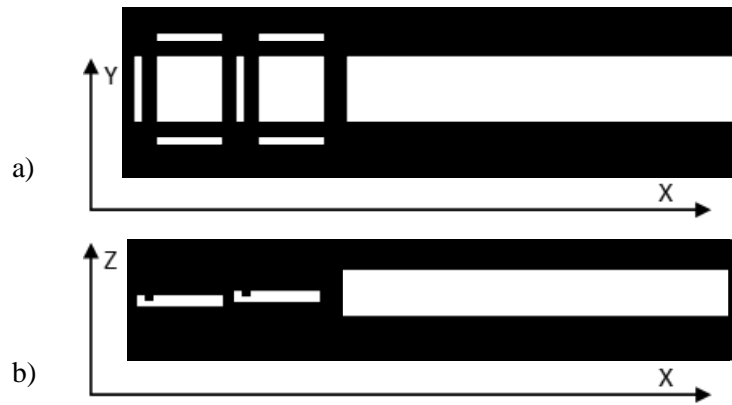


Figure 8 : Visualisation de la disposition de la pièce testée et de notre outil de contrôle dans l'espace de fabrication

Dans cette situation, pour chaque couche, le faisceau d'électron parcourt les contours des surfaces blanches sur la figure 8a puis il fait le remplissage selon l'axe X si la couche est paire, selon l'axe Y sinon. Ainsi, les surfaces de la pièce et des témoins seront balayées dans les mêmes conditions lors du balayage en X qui est critique dans cette configuration.

Les deux témoins ne sont pas identiques du point de vue de la fabrication car ils sont décalés de $50\mu\text{m}$ selon Z (figure 8b). De cette sorte, l'un d'eux aura sa dernière couche balayée selon X, et l'autre selon Y.

3.2.3. Résultats

3.2.3.1. Premiers résultats

La première étape est de fabriquer une pièce dans une configuration défavorable pour être sûr d'obtenir des porosités de seconde catégorie. Ainsi, la longueur de la pièce est fixée à 120mm. Avec les deux témoins, la longueur de la ligne de fusion est de 160mm (il y a 164mm de pièce fabriquées, 4mm sont faits en contours dans notre configuration, le reste est fait par balayage).

La figure 9 fait apparaître les surfaces des deux témoins pour la longueur 160mm.

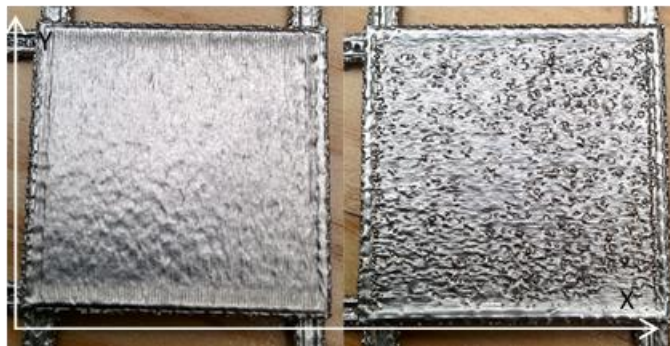


Figure 9 : Photos des deux témoins (dernière couche balayée selon Y à gauche, selon X à droite)

Le témoin de droite (dont la dernière surface est fondue dans la direction X) présente des discontinuités sur sa surface supérieure. Il est alors possible de confirmer que les conditions de fusion de cette couche ne sont pas optimales pour le témoin et donc pour la pièce. Notre outil permet donc de détecter la mauvaise qualité de la fusion.

Le témoin de gauche montre en revanche un aspect de surface proche des surfaces habituelles en sortie de fabrication. Cela montre que la longueur de fusion a bien un impact sur l'aspect visuel de la surface.

L'outil proposé permet donc l'identification des mauvaises conditions de fusion dans cette configuration. Il nous informe également que L_t est inférieur à 160mm.

3.2.3.2. Résultats finaux

Pour détecter la présence de porosités dans la pièce, nous avons prélevé un échantillon de chaque pièce de la campagne expérimentale pour l'analyser en tomographie. La tomographie est faite avec une précision de $1,75\mu\text{m}\pm 0,25$ sur un volume cubique de 2mm de côté à deux endroits différents sur l'échantillon. Cela permet de distinguer clairement les porosités sphériques et non sphériques.

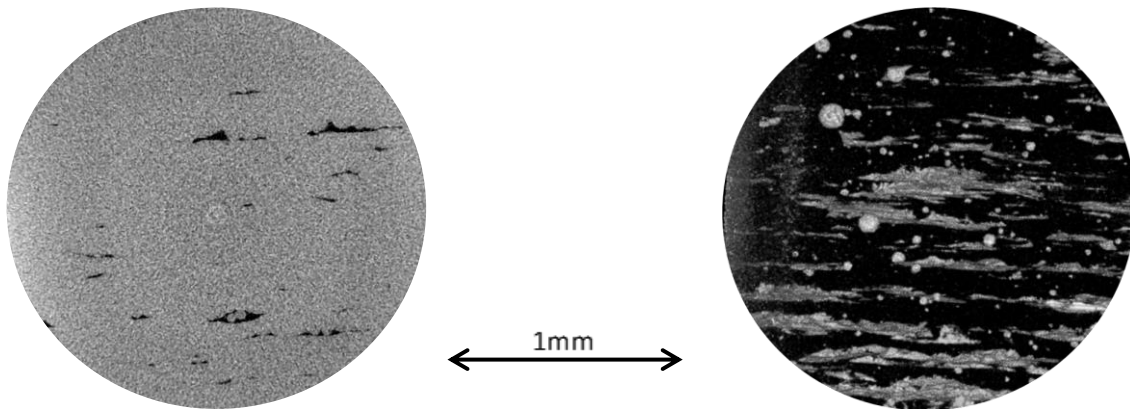


Figure 10 : Résultats de tomographie : une couche (à gauche) et le volume reconstitué (à droite) pour une pièce de longueur 160mm

La figure 10 montre que les porosités apparaissent planes avec une épaisseur de quelques microns et sont orientées dans les directions des plans de fabrication. Il est également possible d'observer des poudres non fondues dans les interstices créés (sur l'image de gauche) par le manque d'énergie.

En testant plusieurs configurations, la corrélation entre l'apparition du défaut sur la surface du témoin et les porosités présentes dans la pièce peut être affinée. Le tableau suivant indique, pour chaque valeur de la première partie du plan d'expérience, le résultat de notre outil et la présence de porosités dans la pièce. Les valeurs aux frontières (telles que 106 et 116mm ont été mesurées sur au moins 2 pièces).

Longueur des lignes de fusion (en mm)	96	106	116	130	160
Présence d'un défaut visuel	Non	Non	Oui	Oui	Oui
Présence de porosités non sphériques	Non	Oui	Oui	Oui	Oui

Tableau 1 : Présence des défauts en fonction de la longueur de fusion

De ces résultats, on déduit que L_t se situe entre 106 et 116mm et que L_p se situe entre 96 et 106mm. Cet écart est significatif, mais dans la mesure où le défaut visuel n'apparaît pas avant le défaut de santé matière, il est impossible de corréler un niveau de détérioration de l'aspect visuel avec l'apparition des porosités dans la pièce : L_p .

Pour aller plus loin dans ces analyses, nous avons cherché L_p avec davantage de précision entre 96 et 106mm (seconde partie du plan d'expérience). Nous obtenons comme résultat l'intervalle 104-106mm. Les paramètres de fusion ne pilotant bien la fusion que jusqu'à 96mm, il y a donc une marge de sécurité de 8mm d'après nos résultats et dans cette configuration.

L'analyse montre également que les porosités apparaissent sur chacune des couches lors de grande longueur de fusion et se raréfient avec la diminution de cette longueur. Ainsi sur la dernière longueur présentant des porosités (106mm), seules 2 couches sont partiellement poreuses sur les 30 analysées et présentant potentiellement de porosités. Il est donc possible que ce défaut n'apparaisse pas obligatoirement à la surface d'un témoin.

3.2.4. Limites et perspectives d'évolution de l'outil

3.2.4.1. Longueur de fusion

La première d'entre elles concerne la taille des témoins qui ajoutent 44mm de longueur de fusion. Cela a pour conséquence directe d'augmenter le risque d'observer des porosités d'une part, et de limiter l'espace de fabrication disponible d'autre part.

Une perspective d'amélioration porte donc sur la réduction de la taille des témoins, en vue de réduire la criticité de longueur de fusion, mais également sur la réduction de leur nombre. En connaissant le fonctionnement de la machine, il est possible de n'utiliser qu'un témoin pour notre outil et de s'assurer qu'il contrôle la qualité de la fusion dans l'axe souhaité : il faut pour cela que la surface supérieure du témoin soit balayée selon cet axe.

3.2.4.2. Fiabilité de l'outil

Les résultats de l'expérimentation montrent que la porosité est détectée visuellement sur le témoin au-delà de son seuil d'apparition dans la pièce. Sur plusieurs expérimentations, le même résultat est obtenu. Ainsi la présence d'un défaut sur le témoin indique la présence de porosité dans la pièce mais la réciproque n'est pas vraie. Dans le cas de la longueur 106mm par exemple, des porosités sont observables dans les pièces sans que les témoins ne montrent d'altération sur leur surface. Notre outil permet de confirmer la présence des porosités mais ne permet pas de le détecter à coup sûr. C'est la principale faiblesse de cette approche. C'est pour cette raison qu'une seconde approche est proposée avec pour objectif une plus grande fiabilité de l'outil.

3.3. Approche par tomographie

3.3.1. Principe

L'approche par tomographie comme l'approche par contrôle visuel fait appel à un témoin qui a pour fonction de tracer la fusion de certaines couches. En revanche, ce n'est pas un contrôle visuel qui doit permettre la détection des porosités mais une analyse tomographique. Cette approche vise également à effectuer un contrôle de la fusion plus efficace que l'approche par contrôle visuel. La tomographie rend en effet possible le contrôle sur plusieurs couches, ce qui est un avantage par rapport à l'approche précédente.

Les avantages d'un contrôle par témoin dans le cas de la tomographie sont, d'une part que le témoin sera conçu pour être analysé par tomographie avec comme objectif de minimiser le temps et le coût de l'opération, et d'autre part qu'il aura un impact plus faible sur la pièce que ceux de l'approche par contrôle visuel. Pour ce faire, le témoin ou la partie analysée du témoin doit être de petite taille mais représentatif du défaut de porosité présent dans la pièce.

3.3.2. Travail envisagé

Nous avons émis l'hypothèse que les conditions de fusion sont les mêmes dans la pièce et dans le témoin et donc que les taux de porosités de la pièce et du témoin sont identiques. Dans un premier temps,

nous vérifions cette hypothèse et nous analysons, à l'aide de la tomographie, des échantillons prélevés dans les témoins utilisés pour l'approche par contrôle visuel, afin de comparer les résultats obtenus sur ces témoins avec ceux que nous avons déjà pour les pièces.

Si les résultats sont concluants, l'étape suivante est de réduire la taille du témoin, afin de perturber le process le moins possible. Nous menons donc une nouvelle campagne d'essais basée, comme précédemment, sur le contrôle d'une pièce simple de forme parallélépipédique de largeur 20mm (axe Y), d'épaisseur 3mm (axe Z) et dont on fait varier la longueur (axe X). Nous avons désormais précisé la longueur de fusion correspondant à l'apparition du défaut (entre 104 et 106mm). Les expérimentations pourront donc se limiter à ces longueurs-là. Comme dans l'approche par contrôle visuel, certaines dimensions du témoin sont égales à celle des pièces pour avoir les mêmes conditions de fusion selon l'axe Y dans le témoin et dans la pièce. Ainsi, la dimension du témoin est de 20mm selon Y. Nous faisons l'hypothèse qu'une valeur de 2mm selon l'axe Z est suffisante pour que le témoin contienne suffisamment de couches et représente le taux de porosité de la pièce (cela sera vérifié expérimentalement). En réduisant suffisamment sa longueur (selon X), il devient alors possible d'analyser le témoin en tomographie sans devoir réaliser de découpe.

Pour réduire cette dimension, deux champs d'étude complémentaires sont envisagés. Comme nous l'avons vu dans l'introduction, la stratégie de fusion d'une couche se fait avec le contour puis le balayage. Le premier champ d'étude consiste donc à fabriquer le témoin sans contour (seulement avec le balayage). De cette manière, on peut réduire la taille du témoin mais également limiter l'impact d'apport d'énergie du contour sur la partie balayée du témoin. Le second vise à diminuer la longueur du témoin. Pour ce faire, une nouvelle campagne d'expérience sera menée pour déterminer la taille minimale que peut avoir le témoin. Le principe est de faire varier la longueur du témoin en conservant une longueur de ligne de fusion fixe (celle qui a été confirmée précédemment). Pour cela, on compense en faisant varier la longueur de la pièce. L'objectif de minimisation de la taille du témoin est de 2mm afin de conserver un élément qui donne matière à observer au tomographe tout en ayant un impact acceptable sur la longueur de ligne de fusion.

L'outil doit être capable de qualifier la fusion de plusieurs types de géométries. Il faut donc tester sa validité sur des géométries telles que les structures treillis ou des pièces optimisées topologiquement, qui sont plus représentatives des pièces usuellement fabriquées par EBM.

Enfin, une étude portera sur l'impact de la dimension du témoin selon l'axe Y sur la validité de l'outil. En effet, les pièces à contrôler peuvent avoir différentes dimensions selon cet axe et nous cherchons un outil compatible avec toutes les géométries et dimensions réalisables. Il faudra donc déterminer la taille que peut prendre le témoin pour avoir le même taux de porosité que les pièces.

4. Conclusions

La technologie EBM depuis sa naissance est de mieux en mieux maîtrisée et tend à devenir un moyen de production industriel. Pour que la technologie soit bien intégrée, les outils de contrôle doivent être adaptés à ce nouveau procédé de fabrication.

Cette étude et les travaux qui l'accompagnent ont permis la création d'un outil simple dédié à caractérisation de la qualité de fusion en EBM. Dans sa configuration actuelle, il ne permet pas de détecter avec précision l'apparition de porosité de seconde catégorie. Cependant, les pistes et les approches explicitées dans ce document devraient bientôt permettre d'obtenir un outil mieux qualifié plus précis et qui peut avoir un rôle important dans la qualification des pièces réalisées en EBM.

Parmi toutes les technologies existantes et utilisées, ce nouvel outil apporte une nouvelle offre de contrôle de la qualité. Avec cette approche et cet outil, c'est la possibilité d'intégrer des outils de traçage

que nous abordons. Cette façon de procéder peut permettre une meilleure qualification des pièces fabriquées et apporte surtout une meilleure compréhension et maîtrise du procédé EBM.

Références

- [1] ARCAM AB, Arcam A1: the Future in Implant Manufacturing, 2010.
<http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-A1.pdf>
- [2] L. Olmos, Etude du Frittage de Poudres par Microtomographie in situ et Modélisation Discrète, Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble – INPG, Grenoble, 2009.
- [3] A. Strondl, O. Lyckfeldt, H. Brodin, U. Ackelid, Characterization and control of powder properties for additive manufacturing, JOM, 67(3), 2015, pp. 549-554.
- [4] H. Gong, K. Rafi, N.V. Karthik, T. Starr, B. Stucker, Defect morphology in Ti-6Al-4V parts fabricated by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting, 24th Annual International Solid Freeform Fabrication, 2013, pp. 440-453.
- [5] W. Wits, S. Carmignato, F. Zanini, T. Vanecker, Porosity testing methods for the quality assessment of selective laser melted parts, CIRP Annals – Manufacturing Technology 65, 2016, pp. 201-204.
- [6] N. Beraud, Fabrication Assistée par Ordinateur pour le procédé EBM, Thèse, Université Grenoble Alpes, 2016.
- [7] H. Galarraga, D. Lados, R. Dehoff, M. Kirka, P. Nandwana, Effects of the microstructure and porosity on properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by Electron Beam Melting (EBM), Additive Manufacturing 10, 2016, pp 47-57.
- [8] S. Bland, N. Aboulkhair, Reducing porosity in additive manufacturing, Metal Powder Report, Volume 70, Issue 2, March-April 2015, pp 79-81.
- [9] M. Cherfaoui, Essais non destructifs, Techniques de l'Ingénieur, 10 juillet 2006.
- [10] C. Thiery, Tomographie à rayons X, Techniques de l'Ingénieur, 10 décembre 2013.
- [11] M. Suard, Characterization and optimization of lattice structures made by Electron Beam Melting, Thèse, Univ. Grenoble Alpes, 2015.
- [12] J. Mireles, C. Terrazas, S. Gaytan, D. Roberson, R. Wicker, Closed-loop automatic feedback control in Electron Beam Melting, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 78, Issue 5, May 2015, pp 1193-1199.
- [13] ARCAM AB, Arcam Q20PLUS – for production of aerospace components, 2016.
<http://www.arcam.com/wp-content/uploads/justaddbrochure-web.pdf>