

Détection des Porosités en Fabrication Additive Métallique

Une Nouvelle Approche pour la Technologie EBM

Alexandre Piaget - Matthieu Museau - Henri Paris
Univ. Grenoble Alpes, CNRS, G-SCOP, Grenoble, France

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 les propriétés des pièces. Ce document s'intéresse ainsi aux technologies qui permettent le contrôle de la bonne fabrication des pièces de manière non destructive. Les avantages et limites de ces technologies sont présentés et étudiés. Dans un second temps, en utilisant les besoins de la détection de porosité et la connaissance de 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 dans ce document.

Mots-clés :

Maîtrise de la Qualité, Fabrication Additive, Electron Beam Melting, Détection de Porosité, Contrôle Non Destructif

I. INTRODUCTION

A. 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 (à quelques exceptions près) toutes les géométries possibles incluses dans une boîte de 195mm de côté et 180mm de hauteur [1].

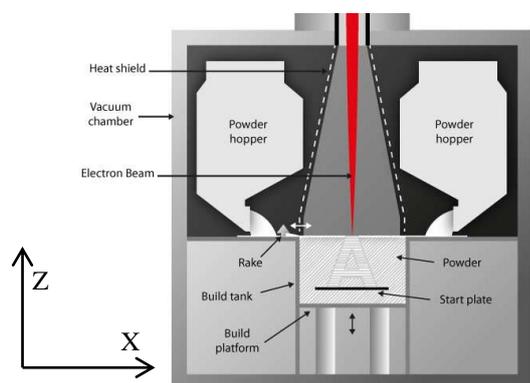


Figure 1. REPRESENTATION DE LA MACHINE A1 [1]

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 fritter 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 de lit de poudre est rendu solide afin de ne pas être influencé par le mouvement du râteau des couches à venir.

Ensuite, le faisceau d'électron fond localement la poudre avec des paramètres dégradés pour créer des éléments surfaciques qui servent à la fabrication des pièces : les supports.

Puis, le faisceau fond localement la poudre pour créer les géométries désirées. 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 μ m est appelée paire. Elle est impaire dans le cas contraire (vaut 50 μ m modulo 100 μ m).

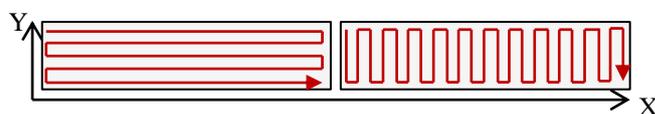


Figure 2. SCHEMA DE PASSAGE DU RATEAU ENTRE LES COUCHES PAIRES (GAUCHE) ET IMPAIRES (DROITE)

Le plateau descend ensuite de 50 μ 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 de toutes les géométries conçues.

B. 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 certaines poudres.

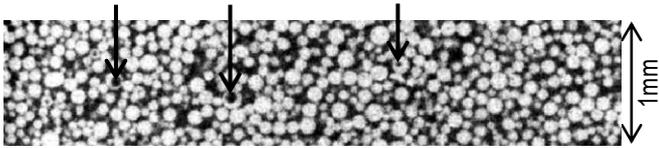


Figure 3. VISUALISATION DE LA POUDRE FRITTEE (TI-6AL-4V) PAR TOMOGRAPHIE A RAYONS X

La seconde catégorie de porosité est celle créée lors de la fabrication. Elle est générée lorsque les conditions de fusion ne correspondent pas aux besoins énergétiques pour la fusion de l'intégralité de la poudre. Ainsi, les paramètres et commandes de la machine ne permettent pas de fondre 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 ne prodigue pas suffisamment d'énergie. Cela a pour effet de fabriquer des surfaces poreuses comme 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 poudres 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 un recouvrement partiel ou complet des potentielles porosités de la couche $n-1$. Ainsi, la figure 4 présente une plaque poreuse car monocouche et balayée dans sa plus grande longueur. Mais une couche additionnelle balayée dans l'autre sens masque ces défauts et les atténue également.

Dans l'industrie, les pièces subissent souvent une 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. Cela a cependant un impact sur la microstructure et le volume final des pièces. Comme ce traitement n'est pas automatique et peut dégrader les caractéristiques des pièces, nous ne nous intéresserons pas à cette solution de correction des porosités [7].

II. DETECTION DE POROSITE ET TECHNOLOGIES EXISTANTES

La détection de porosité a pour objectif l'identification des porosités. 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.

A. 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].

Cependant, 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].

B. 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.

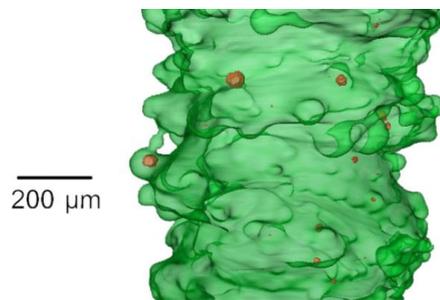


Figure 5. RECONSTITUTION PAR TOMOGRAPHIE D'UNE POUTRE NOMINALEMENT DE Ø1MM FABRIQUEE PAR EBM [11]

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 cher et ne permet pas de contrôler toutes les catégories de pièces. Ainsi, les pièces de grandes dimensions peuvent ne pas être analysées en une fois. 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.

C. *Mesure in Situ*

Implémenter une machine d'outils de mesure in Situ est une solution proposée dans les nouvelles machines vendues par Arcam (modèle Q20 par exemple) [12]. La machine utilisée plus tard 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.

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.

D. *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.

III. CREATION D'UN OUTIL DEDIE

A. *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. 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 l'outil créé qui seront alignés selon l'axe de balayage critique.

L'objectif de cet outil est de faire apparaître visuellement les conditions de fusion. Ainsi, un contrôle visuel doit permettre de valider de la bonne qualité de fusion de la pièce ou mettre en doute cette dernière. 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 éléments non fondus sont éliminés de la couche supérieure et laisse leur empreinte sur la surface. Des discontinuités sur les lignes sont alors observées. Notre concept utilise cette conséquence pour tracer le défaut.

B. *Application*

1) *Principe*

Pour réaliser cette étude et dans le but de caractériser l'outil, nous cherchons à contrôler une pièce simple de forme parallélépipédique de largeur 20mm, d'épaisseur 3mm et de longueur variable. Au-delà de 96mm de longueur, une ligne de fusion n'est plus fabriquée de manière optimale. En incorporant l'outil proposé et en faisant varier la longueur de la pièce à contrôler, il est possible de vérifier que l'outil 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.

Pour vérifier la corrélation entre la qualité de fusion et l'aspect visuel de la surface de notre outil, plusieurs tests avec différentes longueurs de pièce doivent être effectués. En faisant ainsi, nous visons à trouver la longueur de fusion (pièce et outil) à partir de laquelle la surface de l'outil montre une détérioration visible. Par la suite, nous appelons L_e (présence du défaut sur l'éprouvette) cette longueur. Idéalement, L_e doit être proche de 96mm.

Dans un second temps, et une fois L_e déterminée, il faudra vérifier la corrélation entre qualité de la fusion dans la pièce à contrôler et le contrôle visuel de l'outil. En effet, puisque les couches sont refondues, une couche qui présente une mauvaise qualité à un moment donné peut être corrigée a posteriori. Nous vérifierons cette corrélation en analysant la pièce par tomographie. Il sera alors possible de déterminer la longueur L_p à partir de laquelle le défaut est réellement présent dans la pièce.

La différence entre L_p et L_e détermine la précision de l'outil proposé dans sa configuration actuelle et montre également l'influence de la compensation.

Dans le cas où nous observons une différence notable entre L_p et L_e , une caractérisation précise de l'aspect visuel sera mis en place. Ainsi, selon la dégradation, il sera possible de déterminer si la longueur L_p est dépassée et donc s'il y a des porosités dans la pièce. Il devient alors potentiellement possible de prendre en compte l'impact de la compensation en utilisant l'outil.

2) Experimentation

L'outil proposé se compose dans cette partie de deux éprouvettes de contrôle. L'éprouvette et la raison de sa double occurrence sont expliquées ci-après.

La géométrie de l'éprouvette de contrôle créé est un parallélépipède rectangle (de dimension $x=20\text{mm}$, $y=20\text{mm}$ et $z=2\text{mm}$) 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, etc.). La figure 6 montre la conception de l'éprouvette de contrôle.

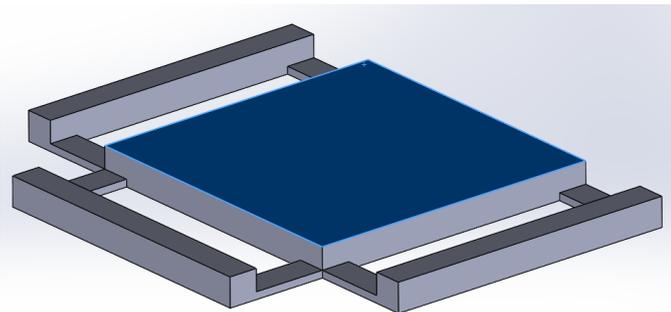


Figure 6. REPRESENTATION NUMERIQUE DE L'ÉPROUVETTE DE CONTRÔLE (SURFACE DE CONTRÔLE EN BLEU)

La pièce à contrôler est placée dans l'espace de fabrication de sorte que sa longueur soit dans un axe de fabrication. L'outil (soit 2 éprouvettes) est ensuite ajouté en l'alignement avec la pièce testée dans le plan XY. La figure 7 illustre cette disposition. La position en Z est choisie pour que la dernière couche des éprouvettes soit réalisée pendant la fabrication de la zone critique de fabrication de la pièce. Dans notre cas, les couches sont identiques, les éprouvettes sont donc positionnées pour contrôler la couche moyenne de notre outil.



Figure 7. VISUALISATION D'UN PLAN DE FABRICATION PRESENTANT LA PIÈCE TESTÉE ET NOTRE OUTIL DE CONTRÔLE DANS LEUR DISPOSITION NOMINALE

Dans cette situation, pour chaque couche, le faisceau d'électron parcourt les contours des surfaces sur la figure 7 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 éprouvettes seront balayées dans les mêmes conditions lors du balayage en X qui est critique dans cette configuration.

Les deux éprouvettes ne sont pas identiques du point de vue de la fabrication car elles sont décalées de $50\mu\text{m}$ en hauteur. De cette sorte, l'une d'elles aura sa dernière couche balayée selon X, et l'autre selon Y.

3) 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 éprouvettes, la longueur de la ligne de fusion est de 164mm.

Après fabrication des éprouvettes et de la pièce testée dans la situation précédemment présentée (cf. III.B.2) l'observation des éprouvettes présente plusieurs points intéressants. La figure 8 fait apparaître les surfaces de l'outil de contrôle.

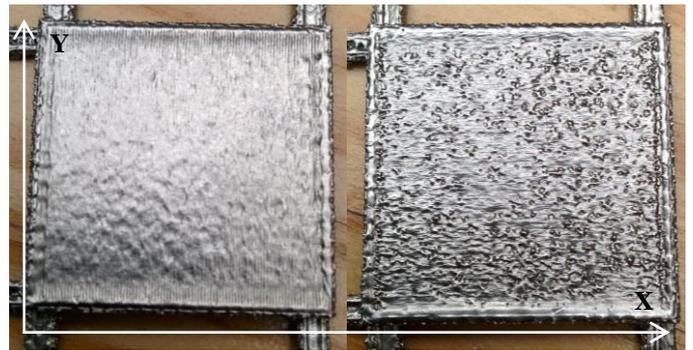


Figure 8. PHOTOS DES DEUX ÉPROUVETTE FABRIQUÉES (DERNIÈRE COUCHE BALAYÉE SELON Y À GAUCHE, SELON X À DROITE)

L'éprouvette 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 lors de cette couche n'étaient pas optimales pour l'outil et donc pour la pièce.

L'éprouvette 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.

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

A ce jour, l'outil n'est pas optimisé et présente des limites pour son utilisation.

1) Longueur de fusion

La première d'entre elles concerne la taille des éprouvettes qui ajoutent 44 mm 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 se porte donc sur la réduction de la taille des éprouvettes, 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'une éprouvette et de s'assurer qu'elle contrôle la qualité de la fusion dans l'axe souhaité : il faut que sa surface supérieure soit balayée selon cet axe.

2) Compensation de fusion entre les couches

Une seconde limite apparaît lors de la recherche d'information sur la compensation de fusion entre les couches. En effet, notre outil permet de détecter qu'une couche n'a pas été fondue dans de bonnes conditions. En revanche, il manque des informations concernant la compensation des défauts par les couches supérieures.

Une piste à développer serait de contrôler la densité de l'éprouvette de contrôle. En effet, une couche sur deux de l'éprouvette est fabriquée selon les conditions de fusion à caractériser. Ainsi, si une couche sur deux présente réellement des porosités, il sera facile de mesurer l'effet de la compensation en analysant la densité de l'éprouvette.

IV. CONCLUSIONS

La technologie EBM depuis sa naissance est de mieux en mieux maîtrisée et tend à devenir un outil 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, la stratégie et l'expérimentation explicitées dans ce document devraient bientôt permettre d'obtenir un outil mieux qualifié et dont nous connaissons l'exacte précision.

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 également une meilleure compréhension du procédé EBM.

V. REFERENCES

- [1] ARCAM AB, "Arcam A1: the Future in Implant Manufacturing", 2010.
<http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-A1.pdf>
- [2] OLMOS, L. "Etude du Frittage de Poudres par Microtomographie in situ et Modélisation Discrète", PhD Thesis. Institut National Polytechnique de Grenoble – INPG, Grenoble, 2009.
- [3] STRONDL, A., LYCKFELDT, O., BRODIN, H. & ACKELID, U. "Characterization and Control of Powder Properties for Additive Manufacturing", JOM, 67(3), 2015, pp. 549-554.
- [4] GONG, H., Rafi, K., KARTHIK, N.V., STARR, T. & STUCKER, B. "Defect Morphology in Ti-6Al-4V Parts Fabricated by Selective Laser Melting and Electron Beam

Melting", 24th Annual International Solid Freeform Fabrication, 440-453.

- [5] WITS, W., CARMIGNATO, S., ZANINI, F. & VANECKER, T., "Porosity testing methods for the quality assessment of selective laser melted parts", CIRP Annals – Manufacturing Technology 65, 2016, pp. 201-204.
- [6] BERAUD, N. "Fabrication Assotitée par Ordinateur pour le Procédé EBM", PhD Thesis, Université Grenoble Alpes, 2016.
- [7] GALARRAGA, H., LADOS, D., DEHOFF, R., KIRKA, M. & NANDWANA, P. "Effects of the Microstructure and Porosity on Properties of Ti-Al-4V ELI Alloy Fabricated by Electron Beam Melting (EBM)", Additive Manufacturing 10, 2016, pp 47-57.
- [8] BLAND, S. & ABOULKHAIR, N. "Reducing Porosity in Additive Manufacturing", Metal Powder Report, Volume 70, Issue 2, March-April 2015, pp 79-81.
- [9] CHERFAOUI, M. "Essais non destructifs", Techniques de l'Ingénieur, 10 juillet 2006
- [10] THIERY, C. "Tomographie à Rayons X", Techniques de l'Ingénieur, 10 décembre 2013
- [11] SUARD, M. "Characterization and Optimization of Lattice Structures made by Electron Beam Melting", PhD Thesis, Univ. Grenoble Alpes, 2015.
- [12] MIRELES, J., TERRAZAS, C., GAYTAN, S., ROBERSON, D. & WICKER, R. "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>