HAL
open science

Analyse de la variation géométrique des pièces produites en fabrication additive EBM - Cas de pièces avec volume surplombant

Soukaina Ghaoui, Yann Ledoux, Alex Ballu, Thanh Hoang, Matthieu Museau, Frédéric Vignat, François Villeneuve

To cite this version:

Soukaina Ghaoui, Yann Ledoux, Alex Ballu, Thanh Hoang, Matthieu Museau, et al.. Analyse de la variation géométrique des pièces produites en fabrication additive EBM - Cas de pièces avec volume surplombant. 16e Colloque National S-mart, Apr 2019, Les Karellis, France. hal-02106747

HAL Id: hal-02106747

https://hal.science/hal-02106747v1

Submitted on 23 Apr 2019

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.

Analyse de la variation géométrique des pièces produites en fabrication additive EBM

Cas de pièces avec volume surplombant

Soukaina GHAOUI, Yann LEDOUX, Alex BALLU
Univ. Bordeaux, I2M, UMR 5295
F-33400 Talence, France

Thanh Hoang VO, Matthieu MUSEAU, Frédéric VIGNAT, François VILLENEUVE
Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP
F-38000 Grenoble, France

Résumé— L'étude proposée consiste à étudier les types de défauts obtenus en fabrication additive EBM (Electron Beam Melting) pour cela, une géométrie particulière a été choisie avec un volume en surplomb. Les défauts géométriques les plus importants se sont localisés sur la face avant (perte de bord) et le dessous de la pièce (variation d'épaisseur). Afin de caractériser la forme des défauts, une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été mise en œuvre et permet d'identifier les modes les plus significatifs de chacun des lots de pièces produits. A partir de ces analyses, il en ressort que les défauts dépendent de la stratégie de fabrication et que les pièces placées sur la périphérie du plateau présentent des défauts de grandes amplitudes.

Mots-clés— Fabrication additive, EBM, Défauts géométriques, Métrologie par coordonnées, Analyse en composantes principales

I. INTRODUCTION

Le développement de la Fabrication Additive (FA) parmi les procédés industriels permet de repenser le système de production de pièces et de permettre une flexibilité de design presque illimitée [1]. Il est désormais possible de produire dans un temps réduit des pièces fonctionnelles et des géométries jusqu'alors impossibles à fabriquer ou à coûts trop élevés. Cette opportunité technologique apporte des gains importants tant sur la production de pièces unitaires (prototype, maintenance…), que pour la production de petites séries ou encore pour l'obtention de formes jusqu'alors impossibles à fabriquer (formes intérieures, lattices…). Cette révolution de fabrication comporte toutefois des freins importants quant à son intégration dans le milieu industriel. D'après [2], les problématiques de qualité des pièces, de réglages du procédé ou de répétabilités de processus sont autant de challenges technologiques et scientifiques à relever pour assurer la bonne intégration de la FA. Ces points sont confirmés dans [3], dans lequel les auteurs précisent qu'à court terme, les procédés de fabrication additive seront confrontés à des limitations importantes concernant la variabilité du procédé impactant fortement la géométrie des pièces obtenues. Le projet GeoCAM (projet ANR-17-CE10-0004 démarré en 11/2017) propose de s'atteler à l'étude de ces variations géométriques en fonction des conditions de fabrication, des matériaux choisis et des géométries des pièces à fabriquer pour des procédés de FA de matériaux métalliques (alliages de titane et d'aluminium) pour le procédé Electron Beam Melting (EBM) et Selective Laser Melting (SLM). Les travaux menés dans ce projet sont dédiés à la fois à l'analyse des défauts géométriques obtenus sur des productions de pièces pour les deux procédés (EBM et SLM), mais également au développement d'outils de simulation numérique afin d'anticiper l'apparition des défauts en fonction des paramètres de réglage des procédés.

Les travaux présentés dans ce papier sont dédiés à l'étude expérimentale de la production sur le procédé EBM de plusieurs lots de pièces en alliage de titane (TA6V) en fonction de paramètres de production différents. L'analyse des défauts obtenus permet de quantifier la dispersion de production intra lot et entre les lots. Dans un second temps, une analyse modale des défauts (Analyse en Composantes Principales) permet d'identifier les typologies des défauts obtenus.

II. ETUDE DE CAS PROPOSE

A. Description de la géométrie retenue

La pièce d'étude correspond à une pièce de laboratoire dont la géométrie est donnée en Figure 1. Cette géométrie a été sélectionnée pour sa partie surplombante reposant directement sur de la poudre consolidée sachant que la pièce est orientée sur la machine de telle manière que la partie surplombante soit horizontale. Il est bien évident que ce type de géométrie n'est pas normalement produit à l'horizontal, mais incliné par rapport au plateau. Ce type de géométrie, réalisé dans ces conditions, permet de mettre en évidence des effets thermomécaniques que nous aborderons par la suite.

Il a été choisi de produire des plateaux (de dimensions 210mm x 210mm x 10mm) de 16 pièces sur une machine EBM (Arcam A1). Nous utilisons un alliage de titane (TA6V). La fabrication se déroule en différentes phases. Tout d'abord, le plateau support est introduit et positionné dans la machine. Ensuite, un vide primaire est réalisé dans l'enceinte afin de limiter les problématiques d'oxydation de poudre au cours de la fabrication et une phase de préchauffage de l'enceinte est réalisée. Pour fabriquer des pièces en TA6V, la température de préchauffage est de 750°C. Après cette phase, la machine dépose des épaisseurs de poudre calibrée de matière (50µm de hauteur) et cette couche est consolidée par le passage du faisceau d'électrons (opération de frittage partiel de poudre). Les zones correspondantes aux futures pièces sont chauffées jusqu'à la fusion de la poudre, puis subissent une phase de refroidissement. Cette séquence de dépôt de poudre, de consolidation et de fusion est répétée jusqu'à la finalisation de

la production. Enfin, le plateau subit une phase de refroidissement jusqu'à la température ambiante (20°C). Le plateau est alors retiré de la machine, dépoudré et les pièces sont alors détachées de leur support.

Pour la production, les pièces sont construites directement sur la poudre consolidée à une distance du plateau de la machine d'environ 2mm. Des supports ont été ajoutés sur la périphérie de la zone horizontale surplombante de la pièce (30mm de long et 20mm de large). Un exemple est donné en Figure 2.

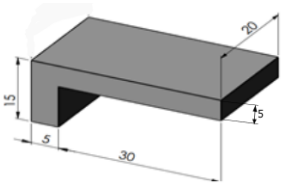

Figure 1. PIECE SUPPORT D'ETUDE.

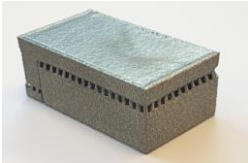

Figure 2. ILLUSTRATION D'UNE PIECE FABRIQUEE AVEC SUPPORTS.

B. *Modification des conditions de production*

La fabrication additive repose sur l'ajout successif de couches de matière fusionnée puis refroidie. Cette séquence de fabrication répétée aboutit à des états de contraintes non négligeables dans la pièce fabriquée. Ces contraintes génèreront par la suite des défauts géométriques qui peuvent avoir des amplitudes non négligeables. Ceci est d'autant plus important lors de l'utilisation d'alliage de titane puisque les gradients thermiques en jeu sont très importants (point de fusion autour de 1700°C). En fonction des options retenues, la fabrication d'une pièce revient à réaliser tout d'abord le contour de la pièce, puis dans un second temps, l'intérieur en effectuant un balayage (hatching strategy). Lors de la production d'un lot de pièces sur un même plateau, pour une couche de poudre, le processus de fusion peut-être réalisé une pièce après l'autre, toutes les pièces en même temps (plus ou moins simultanée) ou bien par groupes de pièces. De manière générale, un groupe peut-être formé d'une seule pièce, de plusieurs pièces ou de toutes les pièces du plateau. Lors de la fusion d'une couche, les différents groupes sont balayés successivement par le faisceau, tandis que les pièces au sein d'un groupe sont balayées de manière simultanée.

Dans cette étude, nous avons modifié la stratégie de regroupement pour en analyser l'influence. Le regroupement influence la date à laquelle une pièce est balayée et également la puissance au travers de la modification de la longueur de ligne de fusion, la ligne de fusion augmentant avec le nombre de pièces dans un groupe. En modifiant le nombre de pièces par lots, nous pouvons ainsi jouer sur le temps entre deux passages successifs de la source de chaleur (faisceau électrons) et ainsi limiter les problèmes de chauffe intense de matière (voir de surfusion). Il a été ainsi testé 3 configurations différentes (désignées par Lots) :

- Lot B : Composé de 16 pièces réalisées individuellement selon 16 groupes. Pour une couche donnée, après préchauffage de la poudre, la surface de la pièce 1 est fusionnée (Contour + Hatching) en premier, la pièce 2 est fabriquée en deuxième et ainsi de suite jusqu'à la fusion des surfaces de l'ensemble des pièces. L'ensemble des pièces gardent la même orientation.
- Lot C : Composé de 16 pièces réalisées simultanément selon 1 groupe : Pour chaque couche, le faisceau fusionne le contour des 16 pièces, et passe ensuite à la phase de « Hatching » où la matière délimitée par le contour de l'ensemble des pièces va être fusionnée. Toutes les pièces ont la même orientation comme indiqué sur la figure 3
- Lot D : Composé de 16 pièces réalisées suivant 1 groupe. Les pièces 9 à 16 sont orientées symétriquement par rapport aux pièces 1 à 8)

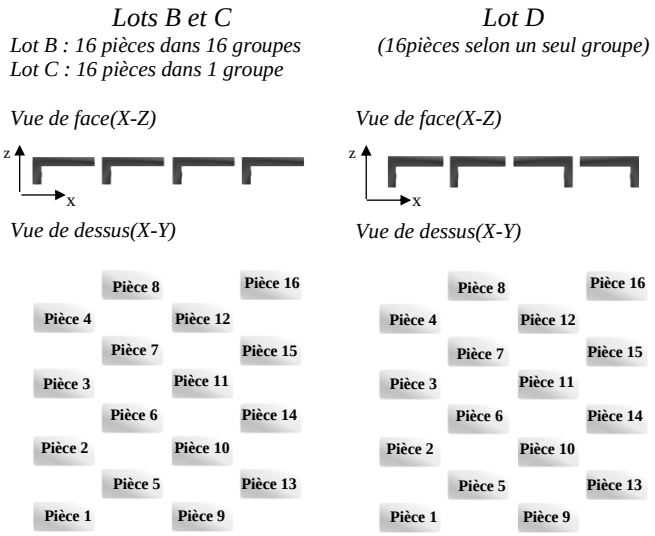

Figure 3. CONFIGURATION DES PIECES SUR LES PLATEAUX REALISES.

III. CHOIX DES MOYENS DE MESURE DES PIECES PRODUITES

A. *Premiers constats concernant les pièces produites*

La fabrication des différents plateaux s'est déroulée sans difficulté majeure. Les 16 pièces pour les 3 plateaux sont toutes intègres et ne se sont pas décrochées de leurs supports. Globalement, les dimensions des pièces semblent respectées, mais il est possible de constater trois principaux types de défauts géométriques :

- Le pourtour de la surface supérieure de la pièce est plus élevé que le reste de la surface (voir figure 5) : des bourrelets se sont formés tout au long des arêtes de la surface supérieure.
- La perte de bord des zones plus massives de la pièce (voir figure 5) : Ce défaut est défini par [4] comme étant une perte de matière au niveau des bords des volumes surplombants causée par le refroidissement successif des couches déposées.

- Une variation d'épaisseur de la partie horizontale (en surplomb) de la pièce (voir figure 5) : L'épaisseur de la pièce ne reste pas constante tout au long de la partie surplombante.

Afin de quantifier ces défauts, différents moyens de métrologie sont mis en œuvre. Nous avons testé l'utilisation :

- d'une machine à mesurer tridimensionnelle,
- d'un scanner 3D optique (GOM ATOS Core).

B. *Comparaison des mesures MMT et scanner 3D*

L'analyse des défauts de pièce d'un point de vue quantitatif repose sur la mesure de points sur la pièce. Afin de sélectionner le moyen le plus adéquat, nous nous sommes concentrés sur une pièce et nous avons comparé les résultats obtenus. Les 4 surfaces de la pièce analysées sont représentées sur la figure 4.

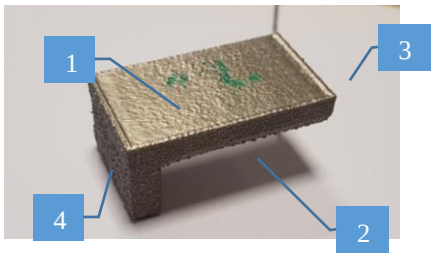

Figure 4. SURFACES MESUREES SUR LA PIECE POUR COMPARER LES MOYENS DE MESURE

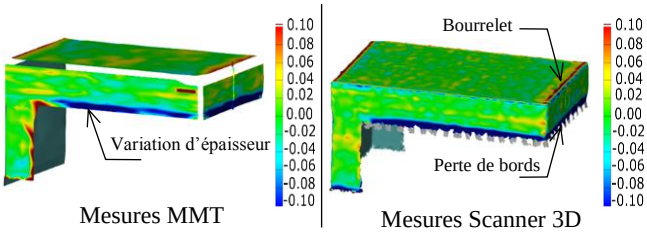

Figure 5. CARTOGRAPHIES D'ECARTS ENTRE UNE PIECE MESUREE (PAR MMT ET SCANNER OPTIQUE) ET LA GEOMETRIE CAO

La mesure des 4 surfaces sur la MMT est effectuée par contact en 1044 points uniformément répartis sur les 4 surfaces. Un maillage a été reconstruit, le résultat est représenté en figure 5.

Concernant la mesure sans contact sur ces 4 surfaces, il a été nécessaire de prendre environ 12 prises de vue et la reconstruction permet d'obtenir environ 47000 points de mesure. Le résultat est donné en figure 5.

Il est choisi de comparer la géométrie mesurée avec la géométrie nominale (CAO) en positionnant les géométries mesurées avec la CAO en prenant comme référence primaire la surface 1, en référence secondaire, la surface 2 et en référence tertiaire, la surface 3 (Figure 4). On peut remarquer que les arêtes ne sont pas reconstruites avec la mesure par MMT, ces arêtes sont mieux définies avec le scanner 3D en raison du nombre de points et la finesse du maillage obtenu. Par ailleurs, l'étendue des défauts constatés sur les surfaces associées est du même ordre de grandeur (±0.1mm) et leur position est similaire. Il y a des zones avec des déviations plus importantes sur la surface 2 au niveau des bords de la pièce pour la mesure MMT probablement en raison de *picots* de matière (attaches des supports) venant empêcher localement le contact de la touche de mesure avec la surface.

Au regard de l'amplitude des défauts à mesurer (±0.1mm) et de l'avantage de la mesure sans contact (prise de nombreux points), il a été décidé de mesurer l'ensemble des pièces à l'aide du scanner 3D. Il est à noter que pour les deux profils qu'on étudiera par la suite, on s'écarte suffisamment des arêtes pour éviter les problèmes de reconstitution au niveau de ces zones.

C. *Mesure de l'ensemble des pièces*

Pour chaque plateau produit, l'ensemble des pièces a été mesuré. Chaque surface a été reconstruite. Afin de caractériser les défauts des pièces obtenus, une coupe des surfaces de la pièce a été réalisée selon un plan noté A sur la figure 6 permettant ainsi d'extraire un profil à analyser.

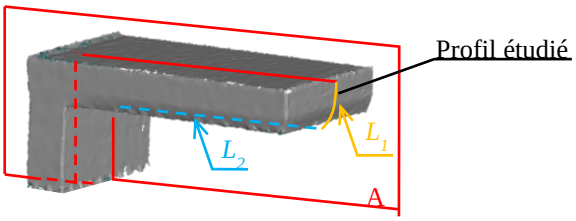

Figure 6. CONSTRUCTION DU PROFIL POUR CHAQUE PIECE.

IV. ANALYSE GEOMETRIQUE DES PIECES PRODUITES

Les différentes pièces des 3 lots réalisés présentent des variations géométriques non négligeables à la fois sur les dimensions et les typologies de défauts. Sur l'ensemble des pièces produites, nous nous sommes intéressés aux éléments du profil repérés par L_1 et L_2 sur la figure 6 correspondant respectivement à la perte de bord et à la variation d'épaisseur. Pour quantifier les défauts, nous avons tracé par lots l'ensemble des écarts entre la géométrie nominale et les profils mesurés sur les pièces.

Le système d'alignement introduit précédemment dans partie III-B, consistant à caler les trois surfaces mesurées 1, 2 et 3 (Figure 4) avec les plans nominaux correspondants, ne permet pas une bonne comparaison de la forme de la perte de bords entre les pièces en raison de la différence de dimensions entre celles-ci. Il a alors été choisi d'ajouter un point de référence noté M (Figure 7) permettant de délimiter la perte de bords des pièces. Celui-ci est défini comme étant le point d'intersection entre l'arc de cercle associé à la surface de dessous et la droite de régression associée à la perte de bords (Voir figure 7). Après l'alignement de l'ensemble des profils suivant le paramétrage indiqué, les écarts par rapport au CAO sont calculés respectivement pour L1 et L2 en 73 et 440 points.

Afin de synthétiser la répartition des écarts, il est proposé de représenter leurs répartitions à l'aide de boîte à moustaches (voir figure 8) regroupés par plateaux et par localisation (perte de bord et variation d'épaisseur). Cela permet de représenter sur une même boîte la répartition des écarts par rapport à leur moyenne, le 1er et 3e quartiles et le 1er et 9e déciles. Sont représentés sous forme de points rouges les valeurs au-delà des

1er et dernier déciles. On peut remarquer que les boites à moustaches des pertes de bords sont relativement similaires pour chacun des plateaux. La moyenne des écarts sont de l'ordre de 0.06mm avec une étendue (du 1er au dernier décile) d'environ 0.6mm. Concernant les caractéristiques de la variation d'épaisseur, une variation entre les lots est bien plus importante passant ainsi de 0.1mm pour le 1e plateau à 0.4mm pour le deuxième et 0.58 pour le troisième.

De ces comparaisons globales, on peut voir que la variation sur la perte de bord est globalement similaire pour les différents plateaux, mais la variation d'épaisseur est réellement différente pour les 3 lots.

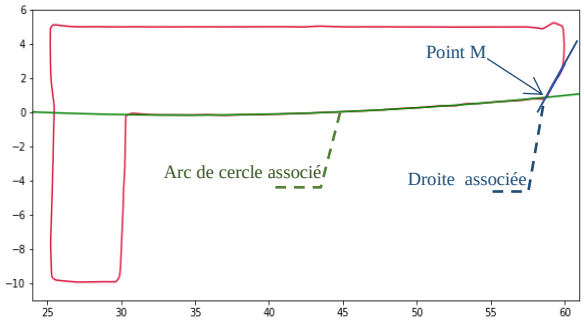

Figure 7. PARAMETRAGE GEOMETRIQUE SUR UNE PIECE TYPE

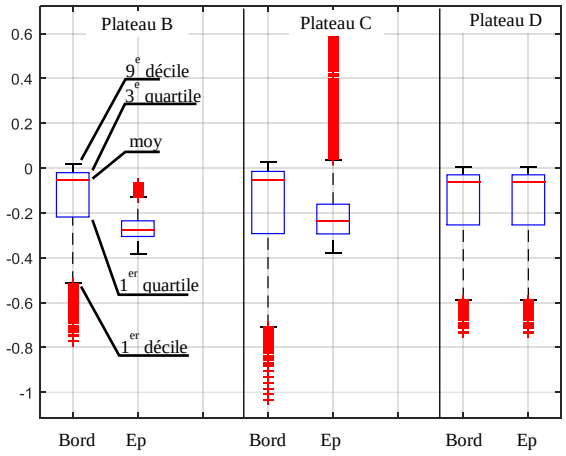

Figure 8. REPARTITION DES ECARTS EN FONCTION DES N° DE PLATEAU.

V. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

Afin de caractériser les variations et d'identifier les influences des conditions de réalisation sur les défauts des pièces produites, il est proposé de mettre en œuvre une Analyse en Composantes Principales (appelée par la suite ACP). C'est une méthode d'analyse statistique multivariée largement éprouvée dans de nombreux domaines [5], [6] et [7]. Dans cette étude, nous l'appliquons pour l'analyse des profils L1 et L2 (voir Figure 6).

A. Méthode

Considérons le lot B. La mesure des pièces permet d'obtenir les écarts des points au niveau des profils. L'ACP permet d'analyser les variations par rapport à une moyenne, aussi, dans un premier temps un profil moyen est calculé (figure 9). Sur le profil moyen, la perte de bord est bien marquée car elle est présente sur toutes les pièces. Ensuite, la matrice de corrélation entre les écarts des points par rapport à la moyenne (ou résidus) est calculée pour L1 et également pour L2 ; les vecteurs propres de cette matrice sont les composantes principales de l'ACP, pour nous les modes géométriques. Ces modes sont donc déterminés statistiquement, directement à partir des mesures sur le lot. Pour 16 pièces, il y a 16 modes calculés ; les trois premiers modes de L1 et de L2 sont représentés en figure 9.

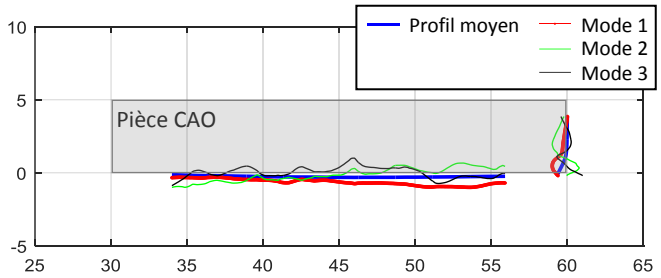

Figure 9. *REPRESENTATION DES 3 PREMIERS MODES POUR LA PERTE DE BORD ET LA PERTE D'EPAISSEUR DANS LE CAS DU PLATEAU 1.* PARAMETRAGE GEOMETRIQUE SUR UNE PIECE TYPE

Le profil d'une pièce particulière est alors décomposable sur ces modes ; le profil est le résultat d'une combinaison linéaire des modes calculés, les coefficients de la combinaison linéaire seront appelés coefficients de décomposition.

Nous observons sur le premier mode de L1, une déviation importante au niveau de la perte de bord. Cela signifie que, selon les pièces, la perte de bord est plus ou moins importante par rapport à la moyenne, une composante de perte de bord va venir s'additionner ou se soustraite au profil moyen. Le mode 1 de L2 se présente, lui, globalement comme une droite inclinée avec une légère inflexion à l'extrémité. Le fait que le mode soit proche d'une droite inclinée nous indique que les profils seront plus ou moins inclinés par rapport au profil moyen. Les modes suivants correspondent à des modes avec des ondulations, mais nous allons constater qu'ils ont peu d'influence.

Les 16 modes calculés ne présentent pas la même importance. Afin de ne retenir qu'un nombre restreint de modes, nous avons calculé le ratio entre la variance expliquée par chacun des modes et la somme des variances. La variance correspond aux valeurs propres de la matrice de corrélation. Cette quantité, appelée inertie (*Iq*), est définie en éq.(1) :

éq.(1). $$I_q = \frac{\lambda_q}{\sum_{k=1}^{16} \lambda_k} \qquad pour\ q \in \{1; 2 \dots 16\}$$

En figure 10, nous constatons ainsi que pour les lots considérés, le premier mode est prépondérant (dans tous les cas explication de plus de 75% des défauts) et nous porterons notre attention sur celui-ci. Le deuxième mode peut néanmoins expliquer certains phénomènes sur le lot D comme repris par la suite.

L'analyse des modes géométriques obtenue par l'ACP et de leur inertie permet donc une analyse des défauts des pièces. Cette analyse est réalisée à deux échelles différentes, en intra-lots (une ACP sur les 16 pièces de chacun des 3 lots) et en extra-lots (ACP globale sur l'ensemble des 48 pièces).

B. Analyse Intra-lots :

La même démarche a été appliquée pour chacun des lots fabriqués B, C et D dans le but d'extraire les premiers modes traduisant les défauts de chaque plateau et ensuite de décomposer les profils réels des pièces sur ces modes principaux.

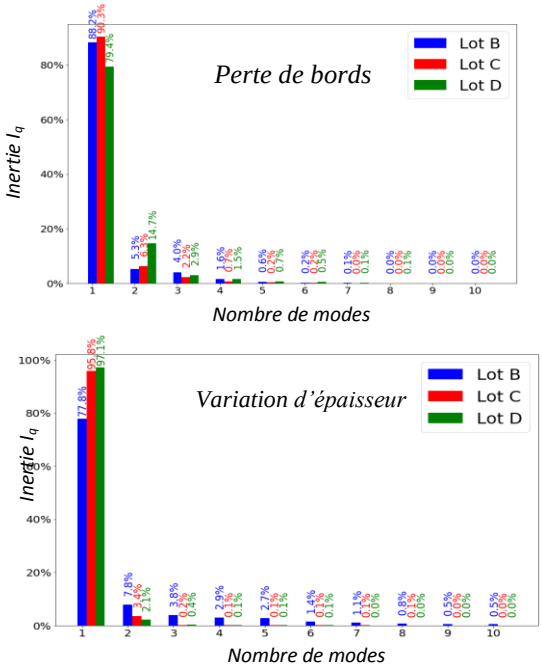

Figure 10. DECOMPOSITION DE L'INERTIE TOTALE SUR LES 10 PREMIERES COMPOSANTES : PERTE DE BORDS (HAUT), VARIATION D'EPAISSEUR (BAS)

Afin d'étudier la corrélation entre perte de bord et variation d'épaisseur, la figure 11 présente les coefficients de décomposition respectivement pour la perte de bord (abscisse) et la variation d'épaisseur (ordonnée) de chaque pièce sur le 1er mode.

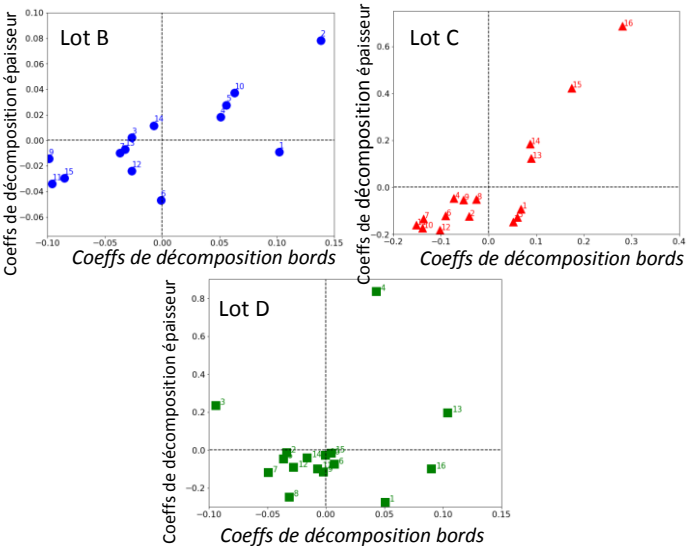

Figure 11. COEFFICIENTS DE DECOMPOSITION SUR LE PREMIER MODE : VARIATION D'EPAISSEUR EN FONCTION DE PERTE DE BORD

Pour les lots B et C, une pièce présentant une perte de bords importante (coefficient de décomposition élevé) présente aussi une variation d'épaisseur élevée. Il apparait même une relation linéaire entre les deux coefficients. Quelques pièces dites hors lot semblent ne pas respecter cette règle (pièces 1 et 6 lot B, pièces 1, 3 et 5 lot C). Le lot D présente plutôt une concentration de points et des pièces hors lot (pièces 1, 3, 4, et 16). Les pièces hors lot présentent des défauts expliqués par les modes suivants (mode 2, mode 3, …, mode 16) non présentés sur la figure 11 et qui contribuent de façon non négligeable dans la décomposition des profils de ces pièces.

C. Comparaison des plateaux

La décomposition des profils L1 caractérisant la perte de bord donne lieu à des coefficients variant généralement entre -0.15mm et 0.15mm (sauf les pièces 15 et 16 du lot C), de ce point de vue il n'y a pas de lien évident entre la séquence de fabrication ou l'orientation des pièces et la perte de bord.

Par contre, pour les 3 configurations, on constate que les pièces présentant une perte de bord importante se situent toujours sur les bords du plateau et très souvent aux angles : pièces 1 et 2 lot B, pièces 15 et 16 lot C et pièces 1, 4, 13 et 16 lot D. Les pièces 15 et 16 du lot C présentent des coefficients de décomposition s'élevant respectivement à 0.2mm et 0.3mm. Ceci traduit l'écart important de ces deux pièces avec le reste des pièces du lot.

Pour le profil L2 des 3 plateaux, on constate que les pièces appartenant au plateau B (16 pièces suivant 16 groupes) présentent moins de dispersions par rapport au profil moyen avec des coefficients de décomposition centrés autour de zéro. Les plateaux C (16 pièces suivant 1 groupe) et D (16 pièces selon 1 groupe) présentent des pièces avec des variations d'épaisseur plus dispersées, les pièces ayant les variations d'épaisseurs les plus importantes se situent comme dans le cas de la perte de bord au bord des plateaux (pièces 13, 14, 15 et 16 plateau C et pièces 3, 4, et 13 plateau D). Sur les pièces présentant le plus d'écart, il semble même que la pièce a pivoté en cours de fabrication.

D. Analyse Extra-lots :

Lors de l'analyse précédente, chaque lot était analysé de manière indépendante. Afin de comparer les lots de pièces entre eux selon des modes issus, une ACP commune est mise en place sur l'ensemble des pièces composant les 3 lots (46 pièces). Comme précédemment, une recherche des composantes significatives est réalisée. Les résultats sont donnés en figure 12 et montrent comme précédemment que seul le premier mode est prépondérant.

La figure 13 illustre les formes des 3 premiers modes obtenus pour la perte de bord et la perte d'épaisseur. Le profil moyen présente des caractéristiques quasi similaires à celles décrites précédemment dans la section IV-B. La forme des 1ers modes pour L1 et L2 sont similaires à ceux obtenus sur la figure 9. Pour les modes suivants, on peut remarquer pour L2, que le mode 2 permet d'incliner le profil de perte d'épaisseur et le 3e mode traduit une courbure sur le profil. Concernant les modes pour la variation d'épaisseur, les formes semblent similaires à celles obtenues en figure 9.

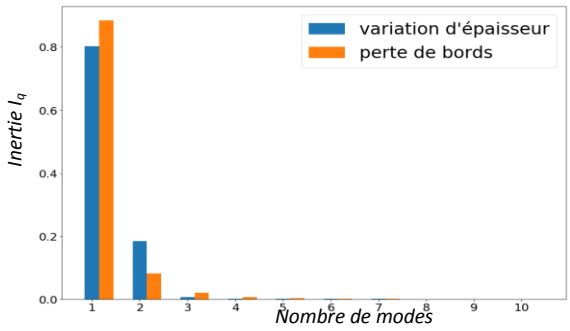

Figure 12. DECOMPOSITION DE L'INERTIE TOTALE SUR LES 10 PREMIERES COMPOSANTES : PERTE DE BORDS ET VARIATION D'EPAISSEUR

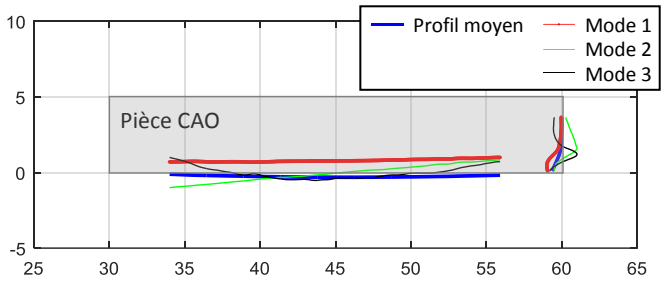

Figure 13. REPRESENTATION DES 3 PREMIERS MODES POUR LA PERTE DE BORD ET LA PERTE D'EPAISSEUR POUR L'ENSEMBLE DES PLATEAUX.

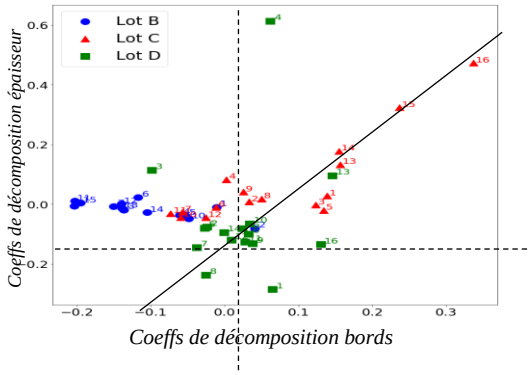

Figure 14. COEFFICIENTS DE DECOMPOSITION SUR LE PREMIER MODE : POUR L'ENSEMBLE DES PIECES PRODUITES.

Nous avons tracé sur un même graphique les coefficients de décomposition pour la perte de bord (abscisse) et la variation d'épaisseur (ordonnée) sur le 1er mode de l'ensemble des 48 pièces. En raison de l'étendue des défauts du lot C, on retrouve clairement la corrélation présentée précédemment, ce qui n'est pas évident pour le lot B en raison d'une amplitude plus petite pour le mode 1 de la variation d'épaisseur. Par ailleurs, cette corrélation semble se retrouver sur les pièces du lot D (droite tracée en noire sur la figure 14. Ainsi, les pièces 13, 16, 7 et 8 du lot D qui semblait hors lots, suivent cette droite. On peut remarquer une différence notable concernant le lot B, avec seulement quelques pièces autour de cette droite de corrélation. De plus, ce lot présente une variation sur la variation d'épaisseur bien plus importante que les lots C et D. Cette différence s'explique en raison de la stratégie de fabrication retenue (lot B, une pièce à la fois, lot C et D, un groupe de 16 pièces fabriqué en même temps). Par ailleurs, comme relevée précédemment, l'amplitude des défauts des pièces périphériques sur le plateau présente globalement des défauts plus importants. Il semble enfin que l'orientation des pièces n'a pas d'influence significative sur les défauts étudiés.

VI. CONCLUSION

Cette étude propose l'étude des défauts géométriques obtenus sur des pièces avec des géométries surplombantes fabriquées par le procédé EBM. Différentes configurations de fabrication et d'orientation de pièces sont testées. La typologie des défauts obtenus reste similaire et caractérisée par une perte de bord et une variation d'épaisseur. Il ressort de plus, une corrélation entre l'étendu de ces défauts et également, que les pièces placées en périphérie du plateau présentent des défauts plus importants. Au-delà de ces travaux préparatoires, une démarche d'analyse des défauts a été mise en place au travers d'une ACP qui permet de caractériser les défauts de manière parcimonieuse et de pouvoir identifier des corrélations entre les défauts. Ces travaux seront complétés par des essais complémentaires sur les conditions de fabrication et la disposition sur le plateau. Nous sommes en cours de développement d'un modèle numérique de simulation de la fabrication afin de mieux comprendre les raisons de l'apparition de ces défauts.

VII. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet ANR GeoCAM soutenu par l'Agence Nationale de Recherche ANR-17-CE10-0004.

VIII. REFERENCES

[1] Khalid Rafi, H., Nadimpalli, K.V., Starr, T.L., and Stucker, B.E. Defect Formation in EBM Parts Built in Horizontal Orientation, Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, 2012, Austin, TX, August 2012

[2] Bourell D., Leu M., Rosen D. Roadmap for Additive Manufacturing: Identifying the Future of Freeform Processing, University of Texas USA, 2009

[3] Merle-Lamoot Nicole 2017, Fabrication additive, prospective, Futur de la fabrication additive, janvier 2017, Edition Martine Automne, ISBN 978-2-11-151552-9

[4] R.Tounsi, F.Vignat. New concept of support structures in Electron Beam Melting manufacturing to reduce geometric defects. 15e Colloque National AIP-Priméca, Avril 2017

[5] B. M. COLOSIMO, M. PACELLA, "On the use of principal component analysis to identify systematic patterns in roundness profiles", Quality and reliability engineering int., 2007, 23:707-725

[6] M. ZHANG, "Discrete shape modeling for geometrical product specifications: Contributions and applications to skin model simulation". PhD thesis, ENS Cachan, 2011.

[7] A. BALLU, P. GOMES, P. MIMOSO, C. CRISTOVÃO, N. CORREIA. "Comparison of mode decomposition methods tested on simulated surfaces", Actes de : 7th JCM, International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing, Catania, Italy, 14-16/9, 2016.