



Maîtrise de la qualité en fabrication additive

Alexandre Piaget

► To cite this version:

Alexandre Piaget. Maîtrise de la qualité en fabrication additive. Autre. Université Grenoble Alpes, 2019. Français. NNT : 2019GREAI004 . tel-02148254

HAL Id: tel-02148254

<https://theses.hal.science/tel-02148254>

Submitted on 5 Jun 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.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE LA
COMMUNAUTE UNIVERSITE GRENOBLE ALPES**

Spécialité : **Génie industriel : conception et production**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Alexandre PIAGET

Thèse dirigée par **Henri PARIS** et
encadrée par **Matthieu MUSEAU**

préparée au sein du **Laboratoire G-SCOP**
dans l'**École Doctorale I-MEP2**

Maîtrise de la Qualité en Fabrication Additive

Thèse soutenue publiquement le **30 Janvier 2019**
devant le jury composé de :

M. Jean-Yves DANTAN

Professeur des Universités aux Arts et Métiers de Metz, Président

M. Jean-Marc LINARES

Professeur des Universités à l'Université d'Aix-Marseille, Rapporteur

M. Matthieu MUSEAU

Maître de conférences à l'Université Grenoble Alpes, Co-encadrant

M. Henri PARIS

Professeur des Universités à l'Université Grenoble Alpes, Directeur

M. Christophe TOURNIER

Professeur des Universités à l'Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay,
Rapporteur



*« This tree's been here, oh, since before anyone can remember. You know, a long time ago,
men and trees were the best of friends. »*

Totoro – Hayao Miyazaki

Remerciements

Pour commencer, je veux remercier les professeurs Jean-Marc Linares et Christophe Tournier pour avoir accepté de rapporter mes travaux, pour la qualité de leur retour et la constructivité de leurs remarques ainsi que le professeur Jean-Yves Dantan pour avoir accepté d'examiner mes travaux et de présider le jury.

Je remercie également mes encadrants Matthieu Museau et Henri Paris pour m'avoir fait confiance, m'avoir aiguillé et surtout pour m'avoir supporté tout au long de ces trois années de thèses.

Parce que le laboratoire G-SCOP est l'endroit idéal pour un doctorant, je tiens à remercier tout le personnel, les enseignants chercheurs et les doctorants de faire de ce lieu un espace de travail convivial et bienveillant. Des remerciements tous particuliers à Marie Jo et Fadila pour votre aide et votre soutien au quotidien !

Au sein des équipes CPP et CC, je tiens à remercier Fred, Franck, Guy et Philippe pour leurs remarques toujours pertinentes, leur curiosité et les échanges que nous avons eu.

Un grand merci également à tout le personnel de l'AIP : Jeff, Alain, Thierry, Christopher et Arnold pour les coups de mains et leur grande sympathie.

Je remercie également Jean-Michel pour m'avoir apporté une aide précieuse dans de nombreuses manips à l'IUT GMP.

A l'équipe du GPM2 du laboratoire SIMAP, un grand merci à Guilhem, Jean-Jacques, Rémy, Edouard, Luc, Stéphane et Pierre pour nos échanges, votre aide en tomographie et votre regard sur mon travail.

Je remercie enfin la société AddUp pour m'avoir donné la chance de finir ma thèse dans de bonnes conditions.

Pour les bons moments passés ensemble, au laboratoire et ailleurs, je veux adresser milles merci aux doctorants et amis du labo. A commencer par la meilleure ADOC du labo : Tom, Matthieu, Franck et Parisa. A la troupe Arc en ciel : Lucie, Gricha, Aurélie, Laura, Lucas et Lucile. A la team Fab Add : Clément, Nicolas, Elodie, Pierre-Thomas, Christelle, Julie, Cédric, Pascal et Hoang. Ainsi qu'à tous ceux que j'ai eu la joie de rencontrer par le labo : Marine, Gwen, Camille K., Camille J., Cyril, Manu, Florence, Margaux, Hugo, Dehia, Yacine, Kleber, Marcel, Justine, Hélène & Dominik. C'était vraiment super chouette d'avoir vécu mes trois ans de thèse en votre compagnie !

Un merci tout particulier à Fred pour toutes les opportunités qu'il m'a présentées en fabrication additive (le béton en Thaïlande, l'EBM chez Caterpillar puis en thèse et maintenant en R&D chez AddUp) !

A mes amis d'avant la thèse, Aurore, Lena, Nico, Marie, Maxime, Aurélien, Quentin, Vivien, Clément, Seb & Quentin, merci pour votre soutien et vos encouragements tout au long de ces trois ans.

A mes amis de toujours, Jérôme et Jérôme, qui m'ont soutenu dans la vie et dans les études depuis mes tous premiers pas ; les moments passés ensemble sont une inépuisable source de bonheur. Un énorme merci à tous les deux (et bon courage pour la dernière ligne droite ;-)) !

Je remercie grandement Emilio, Solange, Sophie, Patrick et Philippe pour leur présence aujourd'hui et l'ensemble de la famille pour votre soutien émotionnel et vos encouragements.

Maîtrise de la Qualité en Fabrication Additive

Remerciements

Ma famille m'a également été d'un grand soutien tout au long de ces trois années, je les en remercie. Un très grand merci à mes oncles et tantes pour être présent aujourd'hui, Josiane, Annie, Nicole, Michel, Alain et Roger. Et un merci tout aussi gros à tous mes cousins et cousines !

A mes parents, mon frère et ma sœur, si j'avais fini de lister toutes les raisons de vous remercier, j'aurais dû faire imprimer un second manuscrit. Je me contenterai ici de vous dire merci, pour tout, je vous aime très fort !

A Marguerite, pour l'amour, le réconfort, la tendresse et le bonheur que tu m'apportes. Merci de remplir mon monde de joies et de merveilles au quotidien. Je t'aime.

Pour avoir relu ce manuscrit avec efficacité et vélocité, merci à Marguerite, à ma mère et à mon père.

Enfin, pour avoir grandement (je dis grandement, mais ils ont tout fait) contribuer à la préparation du pot, je remercie Marguerite, Philippe, Nadège, mes parents, mon frère et ma sœur. Mention spéciale à ma sœur qui a passé plusieurs jours en cuisine pour nous régaler !

Sommaire

Liste des figures	4
Liste des tableaux	7
Chapitre 1. Introduction.....	9
1.1 La fabrication additive.....	9
1.1.1 La fabrication additive et l'industrie	9
1.1.2 Les technologies de fabrication additive	10
1.1.3 Les enjeux de la fabrication additive	12
1.2 Définitions et problématiques.....	14
1.2.1 La qualité en fabrication additive	14
1.2.2 Structure du manuscrit.....	16
Chapitre 2. Maîtrise de la qualité en fabrication additive par EBM.....	19
2.1 Description du processus de fabrication par EBM	19
2.1.1 En amont de la fabrication	19
2.1.2 Procédé EBM	20
2.1.3 En aval de la fabrication.....	25
2.2 Les défauts et limites du procédé EBM.....	26
2.2.1 Les limites de la technologie EBM	26
2.2.2 Avantages de la technologie EBM	30
2.2.3 Les défauts observés	31
2.3 Contrôler la qualité tout au long du procédé	36
2.3.1 Instrumentation des machines de fabrication.....	36
2.3.2 Traceurs de qualité	39
2.3.3 Qualification des paramétries.....	40
2.3.4 Contrôler les pièces fabriquées par EBM.....	41
2.4 Stratégies pour améliorer la qualité des pièces fabriquées.....	45
2.4.1 Conception	45
2.4.2 Préparation de production	45
2.4.3 La fabrication	46
2.4.4 Le post-traitement.....	48
2.5 Conclusion	51
2.5.1 Bilan	51
2.5.2 Perspectives et travaux.....	51
Chapitre 3. Etude de l'homogénéité de l'espace de fabrication.....	53
3.1 Introduction et problématique.....	53
3.1.1 Les études existantes.....	53
3.1.2 Les objectifs de l'étude	54
3.2 Méthodes expérimentales.....	55
3.2.1 Choix de conception des éprouvettes	55
3.2.2 Organisation du lot de fabrication	56
3.2.3 Méthode de contrôle des éprouvettes.....	58

3.3 Résultats et analyse	62
3.3.1 Résultats	62
3.3.2 Analyse.....	66
3.4 Perspectives et solutions	71
3.4.1 Garantir la qualité des pièces.....	71
3.4.2 Homogénéiser les conditions de fabrication dans l'espace de fabrication	72
3.5 Conclusion	73
Chapitre 4. Détection de porosité par l'ajout d'élément témoin	75
4.1 Introduction.....	75
4.1.1 La porosité en fabrication additive	75
4.1.2 Problématique et structure du chapitre	75
4.2 Analyse du procédé	78
4.2.1 La stratégie de balayage	78
4.2.2 La paramétrie de balayage.....	78
4.3 Méthodes de contrôle des témoins.....	81
4.3.1 Contrôle optique.....	81
4.3.2 Contrôle tomographique	83
4.4 Approche par contrôle optique.....	84
4.4.1 Méthode	84
4.4.2 Expérimentation	86
4.4.3 Conclusion	89
4.5 Approche par contrôle tomographique.....	90
4.5.1 Méthode	90
4.5.2 Expérimentation	93
4.5.3 Résultats	94
4.5.4 Critiques et analyses	95
4.5.5 Conclusion	96
4.6 Conclusion	97
Chapitre 5. Mesure de la porosité par tomographie	99
5.1 Introduction.....	99
5.1.1 La tomographie et ses défauts.....	99
5.1.2 Contexte et problématique.....	100
5.1.3 Les solutions de la littérature et leurs applications.....	101
5.1.4 Proposition de solution et plan de l'étude.....	105
5.2 Caractérisation des images.....	106
5.2.1 Recadrage de l'image.....	106
5.2.2 Artefacts de décorrélation	107
5.2.3 Caractérisation du bruit.....	107
5.2.4 L'algorithme Expectation Maximization.....	109
5.3 Méthode de mesure numérique semi-automatique	111
5.3.1 Création de l'histogramme	111
5.3.2 Implémentation du Machine Learning.....	112
5.4 Résultats et critiques	115
5.4.1 Analyse des résultats	115
5.4.2 Tests de robustesse	116

5.4.3 Les limites	117
5.5 Conclusion	119
Chapitre 6. Conclusions et perspectives	121
6.1 Conclusions et principaux apports	121
6.2 Perspectives.....	122
Références	124

Liste des figures

Figure 1.1 Répartition des ventes de machines sur l'année 2014 sur les différents secteurs d'activités [Grasland & Dupont-Calbo, 2016]	9
Figure 1.2 Volume mondial de vente de systèmes de fabrication additive métallique depuis les années 2000 [Wohlers Report 2018]	10
Figure 1.3 Répartition des ventes de machines de fabrication additive métallique en 2016 [SmarTech Report 2017]	12
Figure 1.4 Corrélations entre la qualité d'un produit et les paramètres et signature d'un procédé de fabrication additive [Mani & al. 2015]	14
Figure 1.5 Exemple d'interactions entre les paramètres et les signatures du procédé et leur impact sur la qualité [Sames & al. 2016]	15
Figure 2.1 Exemple de supportage automatique pour un cube avec trois orientations différentes.....	20
Figure 2.2 Schématisation de la machine EBM Arcam A1 [Arcam, 2017]	21
Figure 2.3 Vue microscopique des poudres consolidées par EBM [Martin et al. 2015]	22
Figure 2.4 Représentation du chemin du faisceau d'électrons lors de la phase de hatching d'un (a) lot de pièces sur (b) une couche paire et (c) une couche impaire.	23
Figure 2.5 Fonctions de calcul de l'intensité et de la vitesse du faisceau d'électrons [Everhart & al. 2017]	24
Figure 2.6 Représentation du chemin du faisceau d'électrons lors de la phase de hatching de (a) deux lots de pièces sur une couche paire pour (b) le lot bleu et (c) le lot vert puis sur une couche impaire pour (d) le lot bleu et (e) le lot vert.....	25
Figure 2.7 Surface verticale d'une pièce fabriquée par EBM vue par un microscope électronique à balayage [Karlsson & al. 2013]	26
Figure 2.8 Coupe tomographique d'une poutre imprimée verticalement (a) et projection de la ligne inférieure de la coupe (b) [Persenot & al. 2018].....	27
Figure 2.9 Tomographie reconstituée en 3D d'une poutre (de diamètre 1 mm) fabriquée verticalement avec la poutre en vert et les pores internes en rouge [Suard & al. 2015]	28
Figure 2.10 Image de tomographie d'une pièce poreuse avec pores sphériques (encerclés en rouge) et non sphériques.....	28
Figure 2.11 Exemple de perte de bord entre une géométrie conçue (a) et fabriquée (b) [Dinwiddie & al. 2013]	31
Figure 2.12 Exemple de défaut pour un volume en porte-à-faux : les couches sont déformées et la matière est déplacée créant un vide (entouré en rouge) par rapport à la géométrie conçue	32
Figure 2.13 Exemple de défaut pour un volume architectural observable sur une pièce défectueuse (droite) comparée à une pièce saine (gauche)	32
Figure 2.14 Exemples de déformation d'une surface surplombante [Cheng & Chou, 2015 ; Villar Sanjurjo, 2015]	33
Figure 2.15 Exemple de défaut dans le fichier stl (gauche) et son impact sur la génération de couche (droite)	34
Figure 2.16 Exemple de délamination d'une pièce sur plusieurs couches [Sames & al. 2016]	34
Figure 2.17 Exemple de pièce poreuse vue a) en coupe (pores en noir) et b) en 3D (pores en blanc)	35
Figure 2.18 Image faite avec une caméra infrarouge dans une machine EBM illustrant des défauts de surchauffe [Rodriguez & al. 2012].....	37
Figure 2.19 Schéma d'instrumentation d'une machine SLM [Berumen & al. 2010]	38
Figure 2.20 Lot d'éprouvettes utilisé par Arcam pour caractériser un matériau et évaluer une paramétrie [Bahdou, 2018]	39
Figure 2.21 Représentation d'un lot de fabrication intégrant différents traceurs de qualité [Portolès & al. 2016]	40
Figure 2.22 Géométrie de la pièce test proposée par le NIST [Moylan & al. 2014]	41

Figure 2.23 Tomographie reconstituée d'une pièce poreuse (volume poreux représenté en rouge) [Tammam-Williams & al. 2016b].....	43
Figure 2.24 Schématisation du principe de la tomographie	44
Figure 2.25 Scans d'une couche réalisés à plusieurs itérations de correction de la fusion par le canon ATHENE (pores détectés en rouge) [Osmanlic & al. 2018]	47
Figure 2.26 Coupes tomographiques comparatives de pièces poreuses après fabrication (gauche) et après CIC (droite) [Tammam-Williams & al. 2016b].....	48
Figure 2.27 Coupe virtuelle de pièce tomographiée (a) sortie de machine, (b) après CIC, (c) après TT de 10 minutes à 1035°C, (d) après TT de 10h à 1035°C et (e) après TT de 10 minutes à 1200°C [Tammam-Williams & al. 2016a]	49
Figure 3.1 Lot d'éprouvettes fabriquées pour caractériser l'espace de fabrication [Tiferet & al. 2018]	54
Figure 3.2 Illustration des possibilités d'observations de défauts rendus possibles avec les structures lattices	55
Figure 3.3 Représentation des zones affectées par le défaut.....	56
Figure 3.4 Géométries des éprouvettes mince (à gauche) et structurée (à droite).....	56
Figure 3.5 Représentation des éprouvettes imbriquées en perspective (à gauche) et vues du haut (à droite)	57
Figure 3.6 Exemple de lot de fabrication pour déterminer la répartition des défauts géométriques dans l'espace de fabrication.....	57
Figure 3.7 Illustration des identifications des éprouvettes	58
Figure 3.8 Le MicroVu et une éprouvette dans la configuration du contrôle	59
Figure 3.9 Création d'un repère local propre à la pièce mesurée avec la détection du contour intérieur (a) pour créer l'origine du repère et de l'identifiant (b) pour orienter le repère.....	60
Figure 3.10 Gabarit de test des mailles (à gauche) et exemple de test (à droite)	60
Figure 3.11 Eprouvette structurée défectueuse présentant une rangée de mailles (encadrée en rouge) numérotées dans l'ordre de fabrication (ordre de contrôle également).....	61
Figure 3.12 Défaut (en mm) pour chaque position angulaire d'une pièce	62
Figure 3.13 Nombre de mailles défectueuses pour chaque position angulaire.....	63
Figure 3.14 Cartographie des écarts mesurés sur les pièces pleines (Ø30 mm : bleu ; Ø20 mm : vert)	64
Figure 3.15 Photo de pièces minces fabriquées au centre de l'espace de fabrication (à gauche sur la photo) et au coin supérieur gauche de l'espace de fabrication (à droite sur la photo).....	64
Figure 3.16 Cartographie de la hauteur de pénétration de la déformation (Ø30 mm : bleu ; Ø20 mm : vert ; Ø10 mm : rouge).....	65
Figure 3.17 Défauts mesurés en fonction de la distance entre le centre du plan de fabrication et le point mesuré.....	66
Figure 3.18 Photo du déplacement latéral des premières couches fabriquées sur les tubes de 30 et 20 mm.	67
Figure 3.19 Image infrarouge de la surface d'une couche [Rodriguez & al. 2012]	68
Figure 3.20 Exemple de transformation d'image brute (a) en image seuillée (b).....	69
Figure 3.21 Illustration de la première solution : restriction de l'espace de fabrication.....	71
Figure 3.22 Illustration de la seconde solution : supporter les pièces (à gauche) avec les résultats sur une pièce compromise (à droite).....	71
Figure 4.1 Représentation volumique des pores détectés par tomographie dans un échantillon de titane poreux contenant des pores sphériques (tels que ceux encerclés en vert) et plans (tels que ceux encerclés en rouge)	75
Figure 4.2 Espace de fabrication contenant une production ainsi que divers éléments de contrôle [Portolès & al. 2016]	76
Figure 4.3 : Représentation du chemin du faisceau d'électrons lors de la phase de hatching d'un (a) lot de pièces sur (b) une couche paire et (c) une couche impaire.	78
Figure 4.4 Courbes associées aux fonctions f_1 (en haut) et f_2 (en bas) [Everhart & al. 2017]	79

Figure 4.5 Illustration du lien entre porosité interne et état de surface sur une pièce vue du dessus au microscope optique (a), au microscope électronique à balayage (b), vue en coupe latérale au scanner (c) et au microscope électronique à balayage (d) pour une pièce défectueuse (1) et une pièce valide (2)[Guo & al. 2015]	81
Figure 4.6 Photos de surface supérieure normale (gauche) et dégradée (droite)	82
Figure 4.7 Photo de la surface d'un témoin valide (haut) et défectueux (bas) vue au MicroVu avant (gauche) et après seuillage (droite).	83
Figure 4.8 Schématisation du passage du faisceau d'électrons	84
Figure 4.9 Géométrie générale du témoin pour le contrôle optique	85
Figure 4.10 Schématisation du passage du faisceau d'électrons avec l'ajout de la zone de retournement	85
Figure 4.11 Organisation d'un lot de fabrication et insertion du témoin optique.....	86
Figure 4.12 Stratégie de supportage du témoin vue de dessous (gauche) et en perspective (droite).....	86
Figure 4.13 Représentation de la pièce test, du témoin et de la stratégie de support tels qu'ils sont fabriqués pour la campagne expérimentale	87
Figure 4.14 Illustration du positionnement en hauteur du témoin par rapport à la géométrie des pièces à contrôler	90
Figure 4.15 Organisation d'un lot de fabrication et insertion du témoin tomographique	91
Figure 4.16 Répartition des parties fabriquées en contour (noir) et en hatching (bleu) pour le témoin fabriqué normalement (gauche), fabriqué sans contour (centre) et redimensionné (droite).....	92
Figure 4.17 Stratégie de supportage du témoin vue de dessous (gauche) et en perspective (droite).....	93
Figure 4.18 Visualisation de la pièce test, du témoin, de son annexe et de la stratégie de support tels qu'ils seront fabriqués pour la campagne expérimentale	93
Figure 4.19 Porosité des pièces et des témoins en fonction de la longueur des lignes de fusions	94
Figure 5.1 Schématisation du procédé de tomographie à rayons X.....	99
Figure 5.2 Tranche virtuelle réalisée par tomographie d'une pièce cylindrique illustrant les défauts classiques de la tomographie (artefacts annulaires fléchés en rouge, effet de point en bleue, durcissement du spectre en vert, décorrélation en jaune et le bruit visible sur toute l'image)	100
Figure 5.3 Coupe virtuelle d'un témoin tomographié avec identification des défauts : la décorrélation encadrée en jaune, l'atmosphère en bleue	101
Figure 5.4 Exemple issu de la Figure 5.3 pour illustrer la segmentation d'image par le seuillage à gauche et le résultat attendu après seuillage à droite	102
Figure 5.5 Segmentation d'image de la Figure 5.4 selon 16 méthodes de seuillage différentes	103
Figure 5.6 Illustration de la méthode "bayesian image segmentation using hidden fields" sur une image simulée de 256x256 pixels (en haut à gauche), supervisée (en haut à droite) et non supervisée (en bas à gauche) [Bioucas-Dias & Figueiredo, 2016]	104
Figure 5.7 Illustration du masquage de l'extérieur de la pièce	106
Figure 5.8 Illustration du masquage des artefacts de décorrélation.....	107
Figure 5.9 Illustration du masque total	107
Figure 5.10 Histogramme de l'échantillon sans pore seul à gauche et superposée avec la courbe (en bleu) d'une loi normale de paramètre : $\mu = 133,14$ et $\sigma = 16,34$ à droite	108
Figure 5.11 Représentation de la distribution par la droite de Henry.....	109
Figure 5.12 Position des points références pour le masque de recadrage	111
Figure 5.13 Fonctions utilisant les équations des droites pour le masque de recadrage.....	112
Figure 5.14 Algorithme simplifié de création d'histogramme.....	112
Figure 5.15 Evolution de la modélisation de la distribution à l'initialisation, aux itérations 1, 10 et 100 et à la satisfaction du critère d'arrêt	113
Figure 5.16 Application sur un échantillon poreux avec l'histogramme seul en haut à gauche, superposée avec le cluster matière mesuré en haut à droite et le cluster pore mesuré en bas à gauche, puis avec les deux clusters et leur somme en bas à droite.....	115

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Comparaison des fonctionnalités de différentes technologies de fabrication additive métallique [Sames & al. 2016]	11
Tableau 2.1 Composition chimiques des poudres Arcam [Arcam, 2008a ; 2008b].....	29
Tableau 3.1 Porosité mesurée sur deux échantillons de poudre	69
Tableau 4.1 Résultats de la première phase de la campagne expérimentale	88
Tableau 4.2 Résultats de la seconde phase de la campagne expérimentale	88
Tableau 4.3 Ecart types absolus et relatifs de mesure de porosité pour les témoins et les pièces testées	95
Tableau 5.1 Résultats des tests de normalité	108
Tableau 5.2 Résultats obtenus avec l’algorithme développé pour 20 initialisations aléatoires différentes ...	116
Tableau 5.3 Résultats obtenus pour 20 initialisations aléatoires différentes sur un échantillon peu poreux.	117

Chapitre 1. Introduction

1.1 La fabrication additive

1.1.1 La fabrication additive et l'industrie

Les premières solutions technologiques de fabrication additive apparaissent dans les années 1980. Sous l'appellation vulgarisée d'imprimantes 3D, ces machines sont alors développées à l'unité et destinées au prototypage rapide. Elles permettent de mettre en forme des pièces en plastique et en résine. Progressivement, de nouvelles solutions sont développées, les procédés de fabrication se diversifient et de nouveaux matériaux apparaissent sur le marché de l'impression. Avec l'arrivée des matériaux métalliques, l'appellation fabrication additive fait son apparition. Aujourd'hui, l'impression 3D désigne souvent les machines utilisant le plastique, les polymères ou la résine, en général les machines grand public. La fabrication additive englobe l'impression 3D et désigne également la fabrication des autres matériaux dont le métal. La fabricabilité des matériaux métalliques emmène également de nouveaux secteurs d'activité sur le marché de la fabrication additive et les technologies d'impression 3D ou de fabrication additive voient leur utilisation évoluer : les pièces réalisées ne sont plus uniquement destinées au maquetage, au prototypage ou au design. La fabrication additive devient alors une solution de fabrication de pièces au même titre que l'usinage, les procédés de mise en forme par déformation plastique ou encore le moulage, le frittage et l'injection.

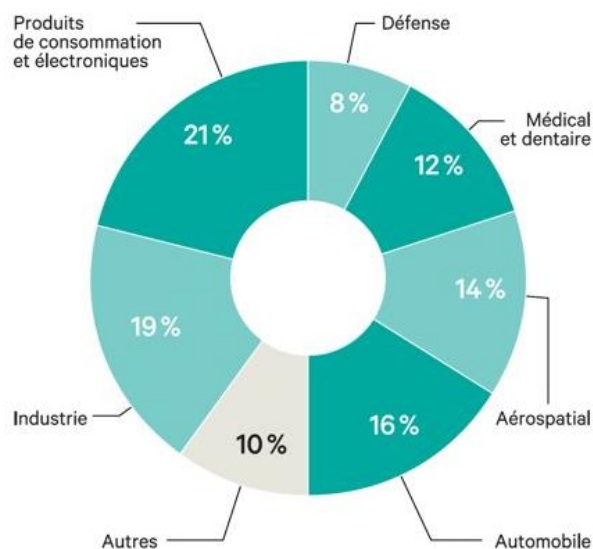


Figure 1.1 Répartition des ventes de machines sur l'année 2014 sur les différents secteurs d'activité [Grasland & Dupont-Calbo, 2016]

Aujourd'hui, plusieurs grands secteurs d'activité (aéronautique, automobile, médecine, etc.) utilisent la fabrication additive comme moyen de production [Wohlers Report 2018]. Les avantages procurés par ces technologies sont nombreux et séduisent des parts grandissantes du marché et un nombre important de secteurs. La fabrication additive permet par exemple l'obtention de pièces allégées : la pièce est fabriquée avec de la matière uniquement là où elle est nécessaire. Cet avantage intéresse plusieurs marchés comme l'automobile, l'aérospatial ou l'aéronautique. D'autres secteurs s'intéressent davantage à la liberté de forme et à la complexité qu'il est possible de donner aux pièces sans surcoût, comme les produits électroniques, de consommation et divers autres secteurs industriels [Wohlers Report 2018]. Enfin, la fabrication additive permet de fabriquer une grande diversité de pièces avec une machine de production, permettant ainsi une personnalisation approfondie des géométries. Cet aspect intéresse particulièrement les secteurs de la

médecine et de la dentition pour la fabrication de prothèses ou d'implants qui doivent être adaptés à chaque patient, tout en ayant des propriétés mécaniques et géométries quasi-similaires quel que soit le patient. La liberté de forme est aussi intéressante pour d'autres utilisations comme l'architecture, le design, etc.

Les technologies de fabrication additive n'ont pas encore atteint le stade de maturité qu'ont les procédés soustractifs et d'obtention de brut utilisés depuis parfois plusieurs millénaires. En revanche, l'engouement important de l'industrie pour ces technologies favorise leur développement et, conséquemment, leur maturation. Cet engouement est parfaitement illustré par la représentation des volumes de vente sur les dernières années (Figure 1.2). Rien que pour les machines métalliques (les machines les plus coûteuses), les volumes de vente sont plus importants chaque année avec une courbe de croissance proche de l'exponentielle.

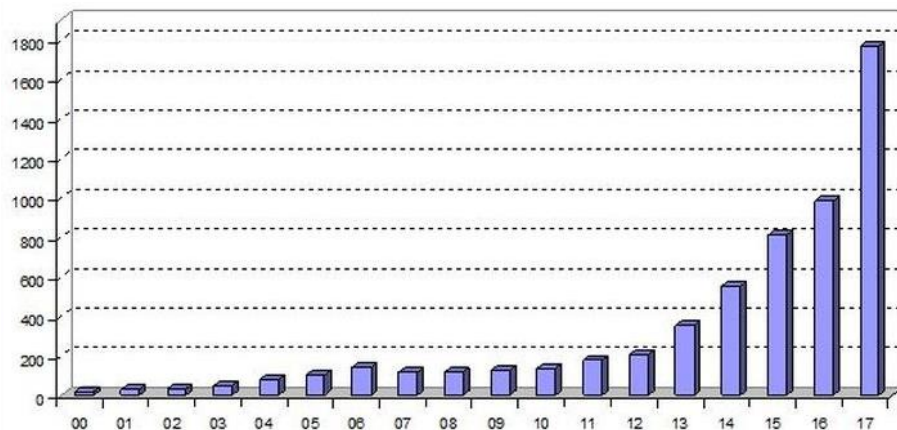


Figure 1.2 Volume mondial de vente de systèmes de fabrication additive métallique depuis les années 2000 [Wohlers Report 2018]

1.1.2 Les technologies de fabrication additive

Le terme de fabrication additive désigne le principe commun à toutes les technologies qui est de fabriquer des pièces par ajout de matière. Il existe cependant un nombre important de technologies différentes sous cette appellation. Rien que pour les technologies permettant la mise en forme de pièces métalliques, il existe plusieurs procédés différents : projection de poudre, lit de poudre, dépôt de fil, etc. Elles présentent chacune des avantages et des inconvénients pour la mise en forme de pièces métalliques. Le Tableau 1.1 présente les distinctions qu'il est possible de faire entre quelques technologies pour la mise en forme de l'alliage de titane Ti-6Al-4V.

Dans ces travaux, la fabrication sur lit de poudre est le principal sujet d'étude. La fabrication sur lit de poudre se fait par l'apport localisé d'énergie sur une succession de couches superposées. Cet apport énergétique permet de fondre la poudre et de créer un volume continu. Dans la catégorie fabrication sur lit de poudre, il existe deux principales technologies : la technologie Electron Beam Melting (EBM), (celle sur laquelle ce manuscrit se penchera tout particulièrement) et la technologie Selective Laser Melting (SLM). Les machines EBM utilisent un faisceau d'électrons alors que les machines SLM utilisent un laser. Chacune de ces sources d'énergies engendre plusieurs contraintes sur les machines qui font que ces deux technologies diffèrent sur certains autres points. Ces différences sont synthétisées dans les deux premières colonnes du Tableau 1.1.

La technologie SLM est la première des technologies de fabrication sur lit de poudre à apparaître sur le marché avec les premières machines commercialisées dans les années 1995. La technologie EBM est commercialisée quelques années plus tard, en 2002, avec la machine S12 de Arcam AB. Comme pour les autres technologies de fabrication additive, les procédés utilisés sont encore peu utilisés et trouvent timidement une

place sur le marché de la production. Sur l'année 2016, les machines vendues par Arcam, l'unique fabricant de machine EBM, représentent 4.6 % du volume des ventes de machines de fabrication additive dédiées au métal [SmarTech Report 2017]. La technologie SLM est nettement plus présente sur le marché avec plus de 80 % du volume des ventes. Les vendeurs concernés sont soulignés en rouge (contre bleu pour le fabricant de machine EBM) sur la Figure 1.3.

Tableau 1.1 Comparaison des fonctionnalités de différentes technologies de fabrication additive métallique [Sames & al. 2016]

<i>Defect or feature</i>	<i>SLM</i>	<i>EBM</i>	<i>DED – Powder fed</i>	<i>DED – Wire fed</i>	<i>Binder jetting</i>	<i>Sheet lamination</i>
<i>Feedstock</i>	Powder	Powder	Powder	Wire	Powder	Sheets
<i>Heat source</i>	Laser	E-beam	Laser	Laser/E-beam	N/A; kiln	N/A; ultrasound
<i>Atmosphere</i>	Inert	Vacuum	Inert	Inert/vacuum	Open air	Open air
<i>Part repair</i>	No	No	Yes	Yes	No	No
<i>New parts</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Multi-material</i>	No	No	Possible	Possible	Infiltration	Yes
<i>Porosity</i>	Low	Low	Low	Low	Yes	At sheet interfaces
<i>Residual stress</i>	Yes	Low	Yes	Yes	Unknown	Unknown
<i>Substrate adherence</i>	Yes	Material dependent	Yes	Yes	N/A	Yes
<i>Cracking</i>	Yes	Not typical	Yes	Yes	Fragile green bodies	No
<i>Delamination</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes
<i>Rapid solidification</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No
<i>In situ aging</i>	No	Yes	No	No	No	No
<i>Overhangs</i>	Yes	Yes	Limited	Limited	Yes	Limited
<i>Mesh structures</i>	Yes	Yes	No	No	Limited	No
<i>Surface finish</i>	Medium-rough	Rough	Medium-poor	Poor but smooth	Medium-rough	Machined
<i>Build clean-up from process</i>	Loose powder	Sintered powder	Some loose powder	N/A	Loose powder	Metal shavings

Cette différence de volume entre les technologies SLM et EBM s'explique d'une part par le prix des machines qui est globalement plus abordable avec la technologie SLM et, d'autre part, par la plus grande maturité de la technologie SLM. Mais la technologie EBM intéresse beaucoup l'industrie pour sa capacité de production nettement supérieure à celle du SLM. Cette distinction est due à la puissance émise par la source d'électrons, la grande dynamique de pilotage de faisceaux d'électrons et l'absorption de l'énergie par la poudre.

Aujourd'hui, d'autres fabricants de machines tentent de mettre au point la technologie EBM, aidés par la péremption des brevets déposés par Arcam AB. Cette nouvelle concurrence pourrait permettre à la technologie EBM de se diversifier (espace de fabrication plus grand ou plus petit, taille de poudre différente, machine automatisée) et de proposer une palette de prix plus large pour saisir un marché, lui aussi, plus large. C'est de bon augure pour la technologie EBM et ses utilisateurs.

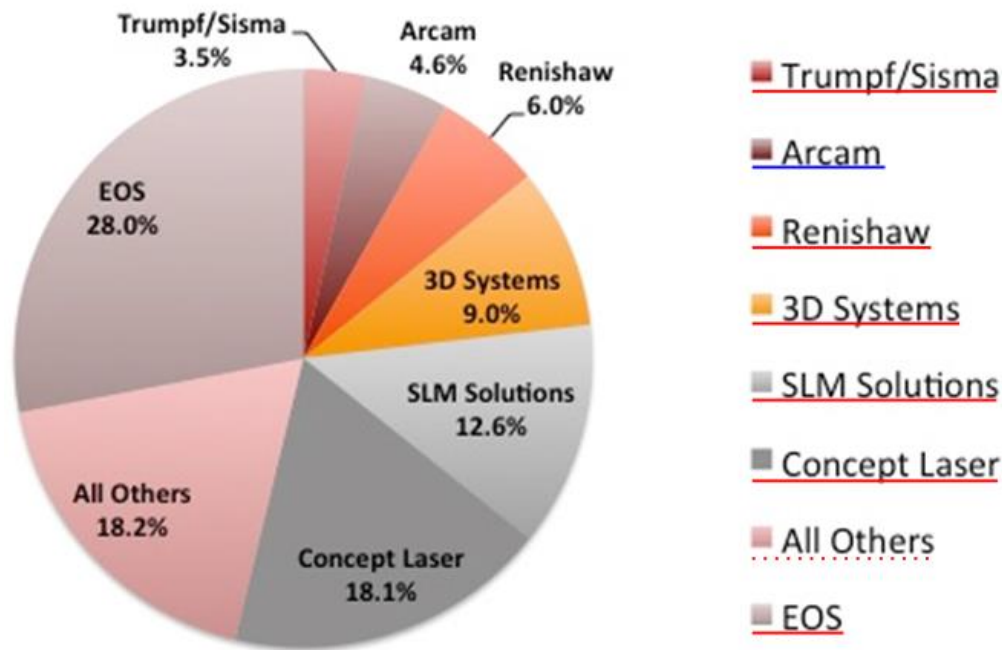


Figure 1.3 Répartition des ventes de machines de fabrication additive métallique en 2016 [SmarTech Report 2017]

1.1.3 Les enjeux de la fabrication additive

Pour que les solutions de fabrication additive deviennent des solutions de production pleinement reconnues, robustes et fiables dans l'industrie, il y a plusieurs enjeux majeurs auxquels ces solutions doivent répondre. Ces enjeux sont identifiables avec le triptyque coût-qualité-délai :

Coût :

L'optimisation du coût passe par deux points : la réduction du prix des machines et du coût de production. Aujourd'hui les machines de fabrication additive restent coûteuses et c'est d'autant plus vrai pour les machines de fabrication métallique. Pour les industriels, il s'agit d'un investissement important et beaucoup de PME sont réticentes à ces investissements. La réduction du prix d'achat des machines devrait permettre à la fois d'écouler de plus grands volumes, d'augmenter la communauté de la fabrication additive et la communication sur ces solutions technologiques. Le prix d'une machine se répercute aussi sur le coût de production (par un calcul d'amortissement de la machine) qui est également un point faible de la technologie. Une géométrie fabriquable en usinage traditionnel est rarement moins chère à produire avec une technologie de fabrication additive [Morretton, 2018]. Les paramètres influents sur le coût de production sont l'amortissement de la machine, le prix des poudres, le prix de l'énergie et aussi la charge salariale pour la manutention des pièces et poudres [Vayre, 2014]. L'enjeu du coût peut alors se généraliser à la réduction du coût de production qui intègre indirectement le prix des machines.

Qualité :

L'aspect qualité porte sur la qualité des pièces, bien qu'elle soit indirectement très liée à celle des machines de production. L'enjeu de la qualité est un enjeu clé de la fabrication additive. En effet, les secteurs d'activité qui s'intéressent à ces technologies sont contraints de produire des pièces de qualité irréprochable. La médecine, l'aviation, l'aérospatial ou l'automobile sont tous des secteurs dont les produits sont utilisés pour la santé et le transport de vies humaines. Il n'est donc pas question pour ces industries de prendre des risques sur la qualité des pièces. Pour cet enjeu, il y a plusieurs points clés à maîtriser : la connaissance du procédé de

fabrication, les moyens de contrôle de la qualité, la répétabilité de fabrication, etc. Cela permet de garantir une production des pièces conformes, même aux industries les plus exigeantes.

Délai :

Le délai est probablement l'enjeu le moins important de la fabrication additive. Comparée aux autres familles de procédés, la fabrication additive présente énormément d'avantages en termes de délai. D'abord, le matériau brut est universel quelle que soit la géométrie des pièces. Il n'y a donc pas de contraintes d'approvisionnement en bruts pour la fabrication. A cela, s'ajoute un temps de production réduit grâce aux solutions de fabrication additive. Cela s'illustre au travers de l'universalité des outils de production. Dans le cas de la fabrication additive, la machine qui servira à fabriquer un prototype peut également être celle qui servira à la production. Ce n'est pas nécessairement vrai pour d'autres procédés comme l'injection ou le moulage. Pour ces raisons, la fabrication additive présente déjà plusieurs avantages sur l'enjeu du délai, il n'est donc pas considéré comme un enjeu clé.

Le délai ne constitue donc pas encore un enjeu pertinent pour la communauté scientifique. Le coût comme la qualité sont davantage au cœur des problématiques de la fabrication additive. Augmenter les connaissances scientifiques sur les procédés de fabrication additive peut permettre de mieux comprendre les conditions qui conduisent à fabriquer des pièces de qualité. En mettant l'axe sur l'enjeu de la qualité, les risques de non qualité sont drastiquement réduits et l'axe du coût est également impacté positivement (la réduction de la non qualité permet d'optimiser l'amortissement machine, l'utilisations des matières premières, etc.). Avec des caractérisations, des expérimentations, des modélisations et des simulations, la communauté scientifique dispose d'outils et de connaissances adaptés à une meilleure maîtrise de la qualité en fabrication additive.

1.2 Définitions et problématiques

1.2.1 La qualité en fabrication additive

Parmi les principaux défis que la fabrication additive doit relever, la qualité occupe une place importante et c'est autour de cet enjeu que les travaux de cette thèse s'orientent. Avant de plonger dans le cœur des travaux, il est important de définir précisément la qualité et comment elle interagit avec les procédés de fabrication additive.

Selon l'ISO 9000, la qualité est « l'aptitude d'un ensemble de caractéristiques intrinsèques d'un objet (produit, service, etc.) à satisfaire des exigences ». Dans le cas de la fabrication de pièces mécaniques par fabrication additive, les objets sont principalement des pièces destinées à être des produits ; les exigences qu'elles doivent satisfaire peuvent être perçues comme des fonctions et des contraintes.

Pour les standards définis par le National Institute of Standards and Technology des Etats-Unis d'Amérique, les critères de qualité des produits issus de la fabrication additive peuvent être répartis dans trois domaines de qualité : géométrique, mécanique et physique [Mani & al. 2015]. La qualité géométrique désigne par exemple le respect des géométries, des formes, des états de surface et des dimensions d'une pièce. La qualité mécanique concerne les propriétés mécaniques, le comportement en fatigue, les contraintes résiduelles, etc. Enfin, la qualité physique porte, entre autres, sur la porosité des pièces, le matériau, sa métallurgie, sa cristallographie, etc. Chacun de ces trois domaines de qualité peut être influencé par le processus de fabrication selon le schéma présenté Figure 1.4.

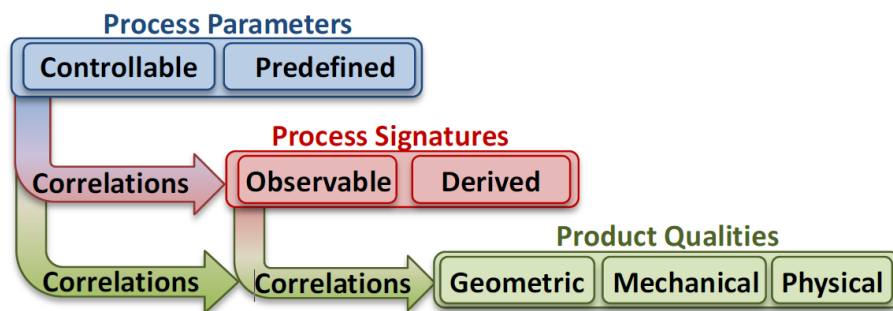


Figure 1.4 Corrélations entre la qualité d'un produit et les paramètres et signature d'un procédé de fabrication additive [Mani & al. 2015]

Dans ce document, nous ferons la distinction entre procédé et processus. Le procédé de fabrication désigne la technologie EBM et en particulier la machine Arcam A1 qui est utilisée pour toutes les expérimentations. A ce procédé sont assignés plusieurs paramètres tels que la puissance du faisceau ou la vitesse de balayage. Le processus désigne un ensemble plus grand, il englobe par exemple le procédé de fabrication, la phase de préparation de la production, la conception des pièces et la création de supports. Ces différentes phases ajoutent au processus un nombre important de paramètres qui influent sur la qualité des pièces et ne peuvent donc pas être ignorés.

Le processus de fabrication impacte la qualité de deux manières différentes. Il y a d'abord les paramètres du processus qui sont accessibles à l'utilisateur et qui vont pouvoir influencer la qualité des pièces comme la taille de la poudre utilisée, la géométrie fabriquée, l'épaisseur des couches, etc. Puis il y a toutes les caractéristiques propres à chaque processus de fabrication et sur lesquelles l'utilisateur n'a pas le contrôle. Dans le processus de fabrication, le procédé EBM introduit plusieurs caractéristiques propres telles que l'histoire thermique des pièces pendant la fabrication, la taille et la température de la piscine de fusion. Sans pouvoir directement contrôler les caractéristiques d'un processus, il est possible d'avoir un impact sur (voire de prédire) la manière dont elles vont s'exprimer sur la qualité d'un produit. Cela peut par exemple se faire

par le choix des paramètres du processus. Typiquement, le choix de l'orientation de fabrication d'une pièce a un impact sur le nombre de surfaces qui requièrent des supports pour être fabricables.

Ce dernier point montre qu'en ayant une connaissance poussée des signatures/caractéristiques du procédé, il est possible d'influencer la qualité des pièces lors du choix des paramètres. La Figure 1.5 est un exemple qui montre comment les paramètres du procédé impactent ses signatures et donc la qualité de manière directe ou indirecte.

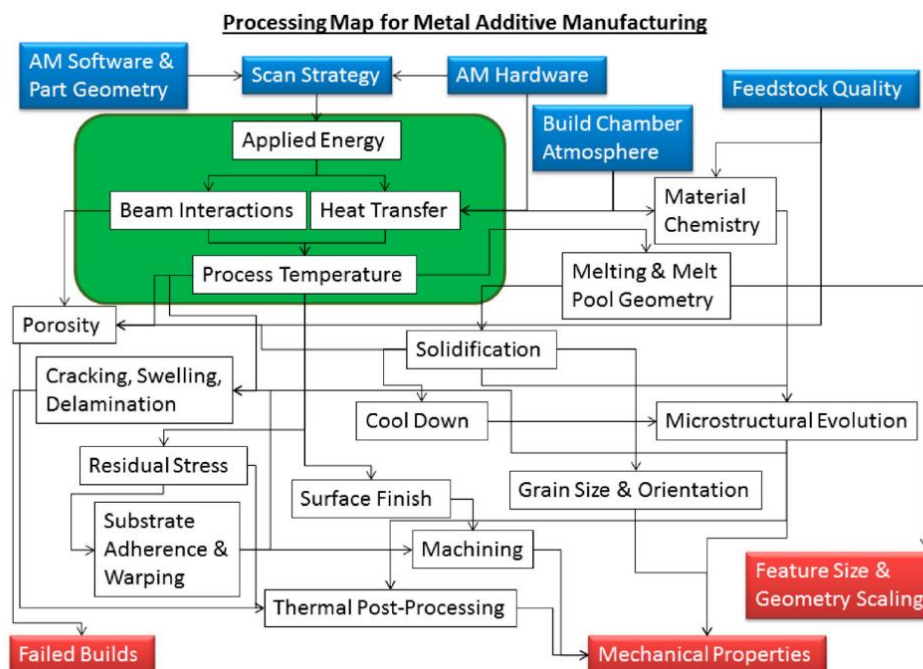


Figure 1.5 Exemple d'interactions entre les paramètres et les signatures du procédé et leur impact sur la qualité [Sames & al. 2016]

Dans cet exemple, certains paramètres du procédé de fabrication sont représentés. Mais il apparaît que le processus pris dans son intégralité est plus complexe et intègre des phases en amont (conception, supportage, ...) et en aval (usinage, polissage, ...). Il est donc capital de prendre le processus de fabrication dans son intégralité pour prendre en compte toutes les sources directes et indirectes ayant un impact possible sur la qualité.

L'enjeu de la qualité en fabrication additive intègre donc la capacité d'anticiper les signatures du procédé sur une pièce et sur ses propriétés mécaniques, physiques et géométriques. Pour que cette anticipation soit rendue possible, il faut modéliser le procédé, caractériser ses signatures, mettre au point des guidelines, des stratégies et des règles. De cette manière, le choix des paramètres adéquats permet d'optimiser la qualité des pièces en fabrication additive. Cela constitue le premier axe de travail de cette thèse.

La qualité en fabrication intègre un second axe de travail : le contrôle de la qualité. Il s'agit là de mesurer les propriétés mécaniques, physiques et géométriques des pièces. Contrôler la qualité d'un produit permet, d'une part, de certifier qu'il est apte à réaliser ses fonctions et, d'autre part, de vérifier que le processus de fabrication ne comporte pas de défaillance. Le contrôle est donc nécessaire pour les industries concernées par la fabrication additive, comme cela a été montré précédemment. Le contrôle est également essentiel pour notre premier axe de travail. En effet, pour améliorer les propriétés d'une pièce, il faut pouvoir évaluer ses dites propriétés. De même, pour caractériser les impacts d'un paramètre du procédé sur la qualité des pièces, il faut pouvoir évaluer la qualité des pièces en fonction de ce paramètre.

Avec les procédés de fabrication traditionnels, plusieurs outils et méthodes de contrôle ont été développés. Certains sont toujours adaptables aux procédés de fabrication additive et à leur production. Cependant, la complexité des pièces rend parfois compliqués voire impossibles ces contrôles et, en parallèle, de nouveaux critères de qualité sont exigés avec la fabrication additive. Conséquemment, les outils et méthodes de contrôles doivent s'adapter et permettre une inspection complète de la qualité des pièces. Cela constitue le second axe de travail de cette thèse.

Finalement, notre modélisation de la qualité en fabrication additive et notre proposition de réponse à la problématique de la maîtrise de la qualité se scinde en deux points :

1. Contrôler la qualité des pièces tout au long du processus de fabrication
2. Optimiser les effets des paramètres du processus et signatures du procédé de fabrication sur la qualité des pièces

1.2.2 Structure du manuscrit

Au cours de ces travaux de thèse, plusieurs aspects de la maîtrise de la qualité sont abordés. Il existe dans la littérature un nombre important de proposition sur le contrôle et l'amélioration de la qualité. Des méthodes et des outils complémentaires à ce que la littérature scientifique propose déjà sont également présentés. Ce manuscrit est donc structuré en conséquence.

Le Chapitre 2 fait la revue de la littérature sur la thématique du contrôle et de l'amélioration de la qualité des pièces réalisées en fabrication additive. Il définira d'abord les limites du champ d'étude en retenant le procédé de fabrication additive par faisceau d'électrons pour produire des pièces en Ti-6Al-4V. Ce processus sert de base pour délimiter le champ des paramètres sélectionnés parmi ceux qui impactent la qualité des pièces. Puis les conséquences possibles du processus de fabrication sur la qualité des pièces sont présentées en s'appuyant sur les défauts et qualités identifiés. C'est l'occasion de voir la nécessité de prendre le processus de fabrication dans son intégralité et non de se limiter au seul procédé EBM. Dans le point suivant sont présentés les outils et méthodes de contrôle que la communauté scientifique a proposés, adaptés et identifiés comme pertinents pour les produits de la fabrication additive. De manière semblable, le dernier point aborde plusieurs solutions d'amélioration de la qualité via la proposition de modélisations et de simulations du procédé de fabrication, de règles de conception et de fabrication ou encore de stratégies d'orientation, etc.

Le Chapitre 3 présente une étude sur l'homogénéité de l'espace de fabrication. Cette étude porte sur l'une des signatures du procédé EBM sur la qualité des pièces qui s'exprime différemment selon la position allouée à une pièce dans l'espace de fabrication. Dans cette étude, les pièces sont géométriquement dégradées lorsqu'elles sont fabriquées à proximité des limites de l'espace de fabrication. L'objectif est de caractériser cette signature et d'identifier les paramètres du processus qui peuvent réduire, limiter voire neutraliser l'impact de la signature sur la qualité géométrique des pièces.

La présence de pores dans les pièces est une source importante de non qualité en fabrication additive. Le Chapitre 4 s'intéresse à cette problématique et propose deux méthodes de détection basées sur l'utilisation d'un élément témoin. La différence principale entre les deux méthodes se situe sur les moyens de contrôle des témoins : dans la première approche, c'est un contrôle visuel qui permet de détecter la présence de pores ; alors que dans la seconde, c'est un contrôle par tomographie. Les problèmes abordés concernent le positionnement du témoin dans l'espace de fabrication, le choix de la géométrie de ce témoin, les expérimentations autour de ces outils et leur évaluation. Ces deux approches sont des propositions d'outils de contrôle dédiés à la fabrication additive métallique par faisceau d'électrons.

Enfin le Chapitre 5 développe un outil de traitement automatique des données issues des tomographies pour mesurer la porosité des pièces. Les images issues de tomographie sont soumises à plusieurs types de

déformations du signal. Dans notre cas d'étude, la principale déformation du signal provient du bruit des images et la proposition de méthode essaye de prendre en compte l'information contenue dans ce bruit. Nous proposons également une méthode basée sur les algorithmes de Machine Learning pour permettre d'analyser le signal originel et donc d'obtenir la mesure précise de la porosité.

Pour clore ce manuscrit, les différents apports de ces travaux de thèse et les perspectives qui en découlent sont synthétiquement présentés dans la conclusion au Chapitre 6.

Chapitre 2. Maîtrise de la qualité en fabrication additive par EBM

Notre approche de la maîtrise de la qualité comporte deux aspects importants pour la fabrication additive par faisceau d'électrons. Le premier aspect consiste à contrôler la qualité, pouvoir qualifier et quantifier les défauts, caractéristiques et autres propriétés de la pièce. Le second consiste à déterminer des stratégies, des solutions permettant d'améliorer la qualité de la pièce. La littérature scientifique actuelle offre de nombreuses propositions de stratégies, pistes d'améliorations et moyens de contrôle pour la technologie EBM.

Le choix du procédé EBM impacte le processus de fabrication depuis la phase de conception jusqu'à la finition. Dans ce chapitre, nous nous intéressons au processus global de fabrication avec la technologie EBM en détaillant principalement la technologie EBM avec la machine Arcam A1. Le point suivant est dédié aux caractéristiques et aux défauts observés sur les pièces fabriquées par EBM. Les outils de contrôle conventionnels et issus de la littérature sont abordés dans le troisième point. Le quatrième et dernier point est consacré aux diverses propositions d'amélioration de la qualité des pièces.

2.1 Description du processus de fabrication par EBM

Cette description a un double objectif. D'abord, elle propose un regard rapide sur le processus intégral de fabrication par EBM, de la phase de conception jusqu'à la phase de finition. Puis elle doit permettre une meilleure compréhension du procédé EBM et des différents paramètres qui influent sur la fabrication. Quelques références de la littérature sont utilisées à titre d'exemple pour compléter cette description basée sur les manuels et recommandations du fabricant de la machine : Arcam.

2.1.1 En amont de la fabrication

Le processus de fabrication commence par la phase de conception. Cette phase permet de donner sa géométrie à la pièce qui doit être fabriquée. Cette géométrie doit permettre à la pièce de remplir ses fonctions et satisfaire ses contraintes, en somme, de répondre au cahier des charges.

Ensuite, la phase de préparation d'un lot de fabrication consiste à récupérer les géométries des pièces à fabriquer pour les organiser dans le volume de fabrication de la machine. Cette préparation se fait en plusieurs étapes :

- Agencer les pièces dans le volume
- Déterminer leur orientation
- Définir des stratégies de supportage

Pour réaliser ces étapes, Arcam recommande l'utilisation du logiciel Magics (Materialise) qui permet également de réparer les fichiers de géométrie lorsqu'ils sont altérés. Concernant le supportage, plusieurs méthodes de génération sont proposées par Magics laissant plus ou moins de liberté à l'utilisateur. La Figure 2.1 illustre quelques exemples de supportage générés par Magics.

Lorsque le lot de pièces est organisé et que les supports sont générés, les géométries associées sont exportées au format stl puis importées dans Build Assembler (Arcam AB). Ce logiciel réalise la découpe des différentes géométries en couches. Ces couches sont ensuite transmises au logiciel EBM Control (logiciel et automate de la machine Arcam A1) via un fichier abf. C'est le logiciel EBM Control qui attribue à chaque lot de pièces et de supports leurs paramètres de fabrication et qui génère à chaque couche les trajectoires du faisceau.

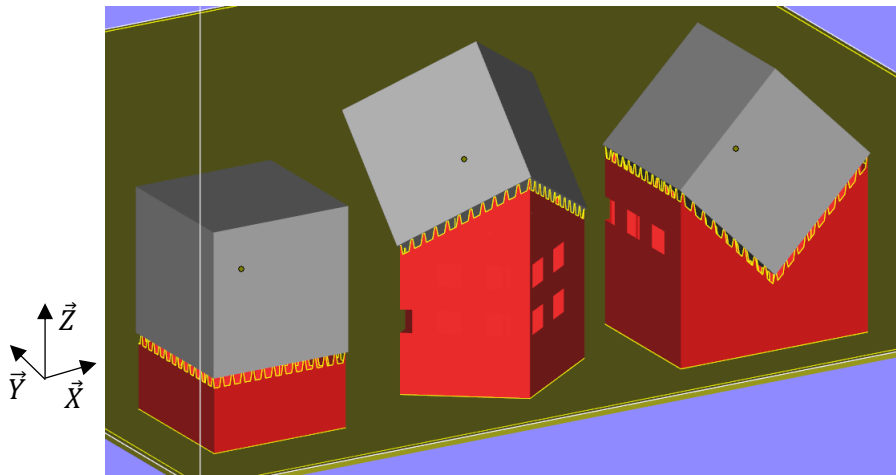


Figure 2.1 Exemple de supportage automatique pour un cube avec trois orientations différentes

2.1.2 Procédé EBM

Le procédé EBM constitue le centre d'intérêt de ce chapitre. Dans cette partie, nous détaillerons ce procédé à travers trois points. Un premier point pour comprendre le fonctionnement général d'une machine Arcam A1. Un second pour entrer dans les détails de la fabrication sur lit de poudre. Et un dernier point apportant des précisions sur les stratégies de fusion par faisceau d'électrons.

2.1.2.1 Principe général de l'EBM

La machine EBM est constituée de deux principales parties : la colonne et la chambre de fabrication, elles sont représentées sur la Figure 2.2. La colonne fonctionne avec un canon à électrons et trois groupes de bobines qui agissent sur le faisceau comme des lentilles en optique. Elles permettent de concentrer les électrons en un faisceau fin et de le diriger dans la chambre de fabrication.

La chambre de fabrication est composée de deux réservoirs de poudre (*powder hoppers* sur la Figure 2.2), d'un système de ratissage et d'une plateforme de fabrication. Le râteau (*rake*) mis en mouvement par le système de ratissage permet de prélever une quantité contrôlée de poudre et de la répartir sur la surface de la zone de fabrication. La plateforme de fabrication (*build platform*) permet d'abaisser, entre chaque couche, l'ensemble de la poudre et des pièces contenues dans l'enceinte de fabrication.

Le procédé de fabrication par EBM suit plusieurs étapes. Après avoir suivi les consignes Arcam et calibré plusieurs éléments [Arcam, 2011] pour que la machine puisse fabriquer des pièces dans de bonnes conditions, l'enceinte de fabrication est refermée et mise sous atmosphère pseudo-vide ($\approx 10^{-7}$ Pa). Tout au long du procédé, les pompes tournent à plein régime et le pseudo-vide est maintenu par injection d'hélium dans l'atmosphère de la machine. Le faisceau est ensuite activé, il vient balayer la plaque de départ (*start plate* sur la Figure 2.2) et porter sa température à 730 °C.

Lorsque cette température est atteinte (elle est contrôlée par un thermocouple placé sous la plaque de départ), le processus de fabrication itératif s'enclenche alors : la plateforme descend de la hauteur d'une couche (chaque couche fait 50 μm dans notre cas) et le râteau vient combler l'espace alors libéré avec de la poudre. Le faisceau d'électrons consolide ensuite la nouvelle couche de poudre et fait monter sa température à une valeur proche de 730 °C. Puis selon les choix de l'utilisateur (l'ordre peut varier), le faisceau d'électrons fabrique successivement, les géométries architecturées, les géométries massives et les supports de la couche (plus de détails dans les parties 2.1.2.2 Fabrication sur lit de poudre et 2.1.2.3 Stratégies de fusion). Ce procédé se répète couche après couche jusqu'à la dernière couche à fabriquer, c'est le principe des technologies dites *powder bed*.

Une fois la dernière couche fabriquée, la température de l'enceinte de fabrication diminue jusqu'à un premier seuil. De l'hélium est alors injecté dans la machine pour accélérer la diminution de la température jusqu'à la température ambiante. La chambre de fabrication est alors ramenée à la pression atmosphérique puis ouverte pour extraire un bloc contenant les pièces fabriquées. Ces pièces se retrouvent emprisonnées dans la poudre consolidée tout au long de la fabrication.

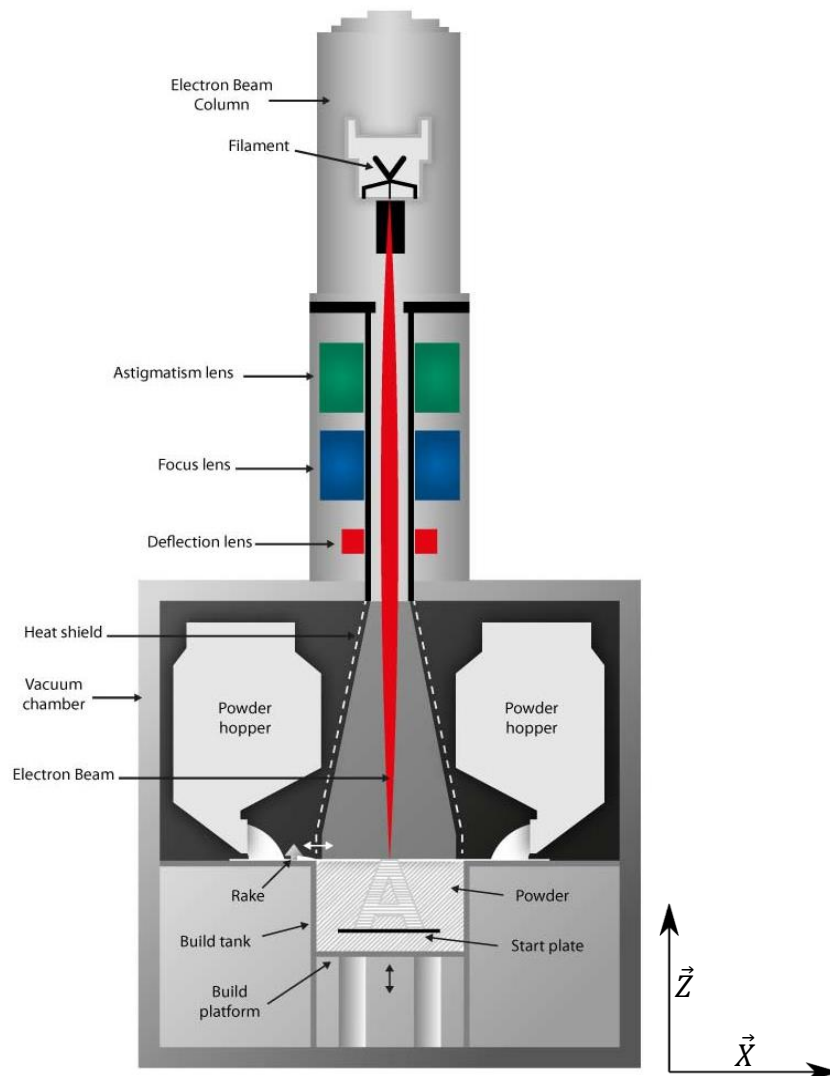


Figure 2.2 Schématisation de la machine EBM Arcam A1 [Arcam, 2017]

2.1.2.2 Fabrication sur lit de poudre

On s'intéresse dans cette section à ce qu'il se passe au niveau d'une couche de fabrication. Comme dit dans la section précédente, la réalisation d'une couche se fait en cinq étapes :

1. Descente du plateau
2. Ajout de la poudre par ratissage : *rake*
3. Consolidation de la poudre : *preheat*
4. Fusion des pièces : *melt*
 - 4.1. Fusion des contours : *contour*
 - 4.2. Fusion des parties internes : *hatching*
5. Fusion des supports : *wafer*

Pour la plupart des étapes (toutes sauf celle du plateau), l'utilisateur affecte une stratégie à l'étape. Cette stratégie est un ensemble de paramètres dont certains sont modifiables par l'utilisateur. Les noms génériques

des stratégies sont donnés en italique pour chacune des étapes concernées (par exemple *rake* pour la stratégie de ratissage). Cette routine peut être modifiée, par exemple, en fondant plusieurs lots de pièces dans une même production. Il est alors possible de les fabriquer avec la routine suivante :

1. Descente du plateau
2. Ajout de poudre par ratissage : *rake*
3. Consolidation de la poudre : *preheat*
4. Fusion des pièces du lot 1 : *melt1*
 - 4.1. Fusion des contours : *contour1*
 - 4.2. Fusion des parties internes : *hatching1*
5. Fusion des pièces du lot 2 : *melt2*
 - 5.1. Fusion des contours : *contour2*
 - 5.2. Fusion des parties internes : *hatching2*
6. Fusion des supports : *wafer*

Cela permet d'affecter des stratégies de fusion différentes pour chaque lot. Cela s'applique lors de la fabrication des structures lattices et des pièces massives dans une même production.

2.1.2.3 Stratégies de fusion

Les phases de consolidation de la poudre, de fusion sélective de la poudre pour fabriquer les pièces et pour fabriquer les supports sont les trois phases sur lesquelles les choix de l'utilisateur, en termes de stratégies, peuvent avoir le plus d'impact.

~ *Preheat*

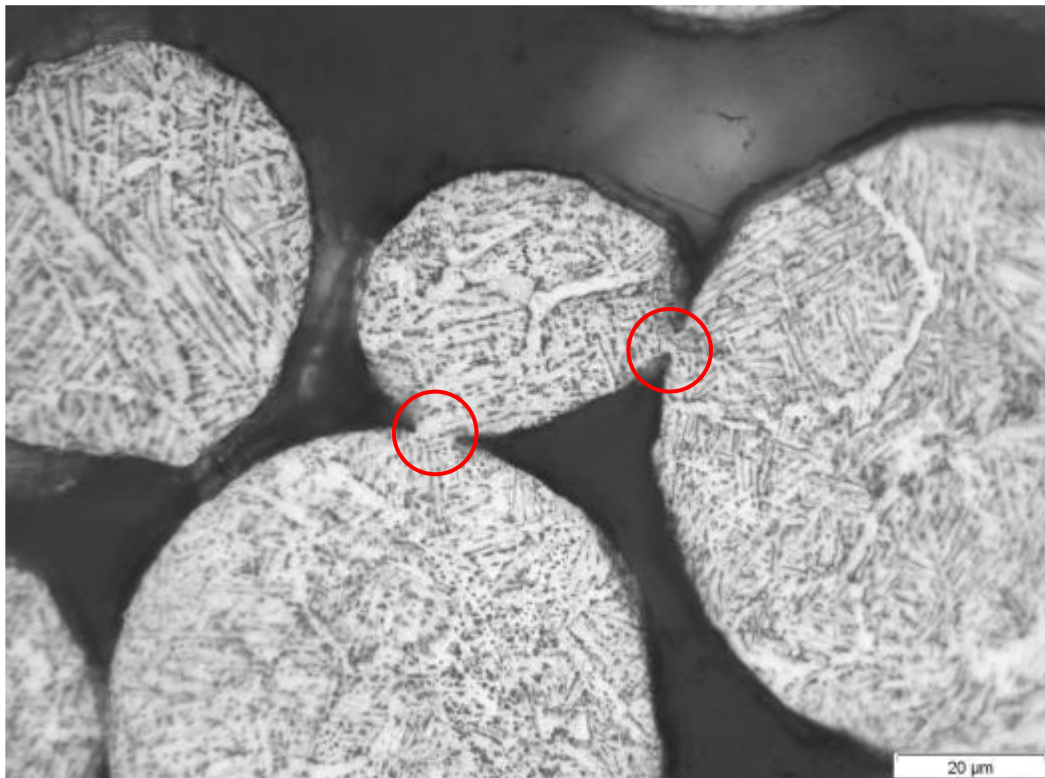


Figure 2.3 Vue microscopique des poudres consolidées par EBM [Martin et al. 2015]

La phase de consolidation de la poudre a plusieurs rôles dans la fabrication des pièces par EBM. Lors de cette phase, le faisceau d'électrons va rapidement balayer la nouvelle couche de poudre dans son intégralité. La stratégie de *preheat* standard proposée par Arcam permet de porter la température de la couche à 730°C.

Cela a pour effet de créer des connexions entre les grains de poudre appelées des cous. Ces cous sont observables sur la Figure 2.3. Cette phase de préchauffe a des effets similaires à ceux d'un frittage sur la poudre. Mais ce frittage est trop léger pour que la poudre puisse être qualifiée de frittée. En effet, la densité de la poudre et la taille des cous restent trop faibles pour que cela corresponde à du frittage ; la poudre est dite consolidée. Il résulte de cette consolidation une augmentation des conductivités thermiques et électriques de la poudre ainsi qu'une solidification du lot de poudre qui se comporte alors comme un solide [Olmos, 2009].

~ Melt

La phase de fusion est constituée de deux sous étapes : la fusion des contours de la couche associés aux pièces et la fusion de la partie interne des pièces. Ces deux sous étapes sont respectivement pilotées par les stratégies de fusion *contour* et *hatching*.

Les contours des pièces sont fabriqués en premier. Les paramètres standards de la stratégie contour génèrent deux trajectoires concentriques (interne et externe) de contour. Ces deux trajectoires sont parcourues en multispot, ce qui signifie que le faisceau d'électrons agit simultanément en plusieurs endroits. Les deux trajectoires vont donc être parcourues par morceaux. Les trajectoires, interne et externe, ont des paramètres (vitesse, intensité, ...) indépendamment modifiables.

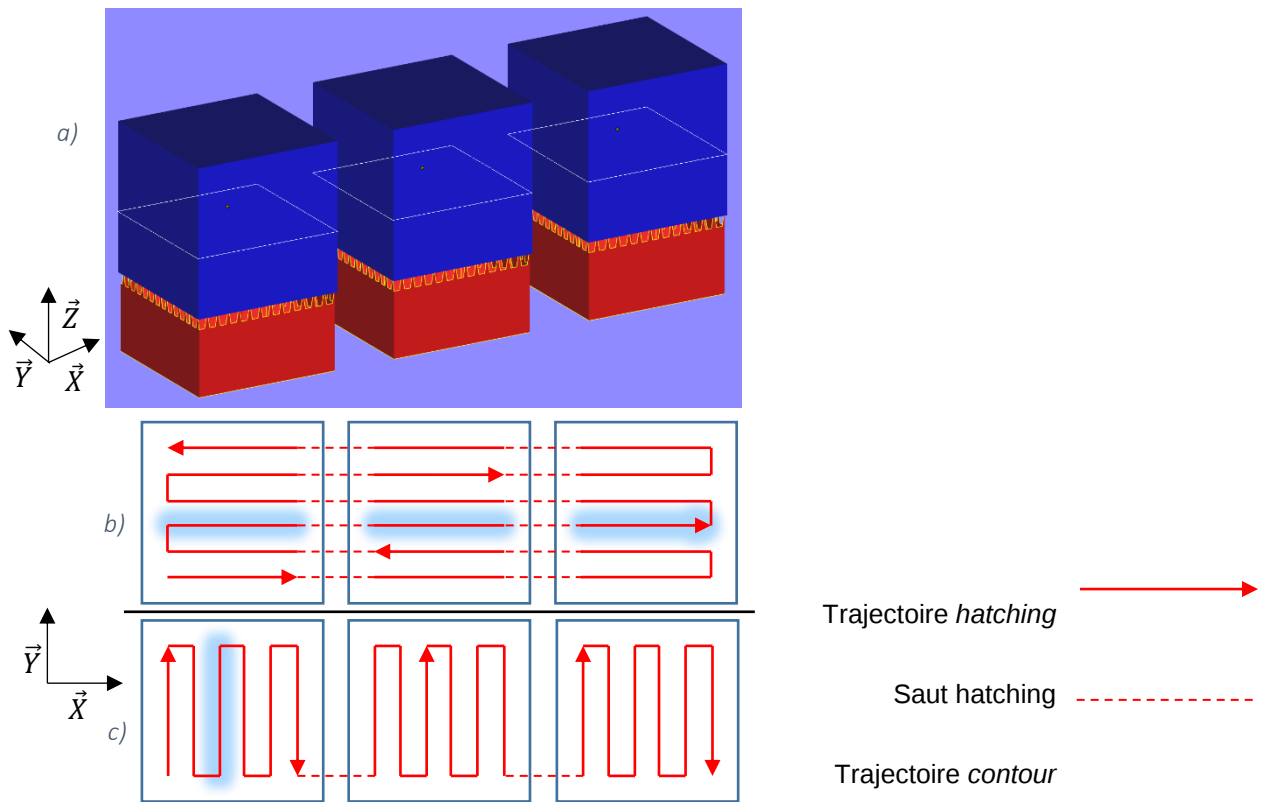


Figure 2.4 Représentation du chemin du faisceau d'électrons lors de la phase de hatching d'un lot de pièces (a) sur une couche paire (b) et une couche impaire (c)

Les paramètres standards du hatching n'utilisent pas le multispot du contour. La surface interne à fondre est parcourue par un balayage illustré schématiquement sur la Figure 2.4. Cet exemple est constitué d'un alignement de trois cubes identiques fabriqués simultanément (dans un même lot). Sur cette figure, les couches sont tour à tour balayées selon l'axe $\vec{X}$ ou l'axe $\vec{Y}$. La direction de balayage est déterminée par la position en hauteur de la couche. Les couches ayant une altitude multiple de $100\ \mu\text{m}$ sont balayées selon l'axe $\vec{X}$ (Figure 2.4, b). Elles sont appelées couches paires dans la suite du document. Les autres couches sont

balayées selon l'axe $\vec{Y}$ (Figure 2.4, c) et sont appelées couches impaires. Dans la configuration présentée, les lignes de fusion sont discontinues pour les couches paires. Le faisceau d'électrons effectue un déplacement à haute vitesse lorsqu'il change de cube, suffisamment rapidement pour ne pas significativement apporter d'énergie à la poudre entre les deux cubes.

Une ligne de fusion peut être continue ou discontinue comme l'illustrent les deux cas mis en lumière sur la Figure 2.4. Lorsqu'une ligne de fusion est discontinue (Figure 2.4b), le faisceau d'électrons est maintenu allumé. Alors, pour ne pas fondre la matière entre les pièces, le faisceau est simplement accéléré sur la portion en pointillés.

Qu'elle soit continue ou discontinue, une ligne de fusion est paramétrée selon la longueur de la ligne à fondre. Deux fonctions permettent de déterminer l'intensité et la vitesse du faisceau à partir de la longueur de la ligne (voir Figure 2.5). La première fonction détermine le courant du faisceau d'électrons (*beam current*) en fonction de la longueur de la ligne de fusion (*scan length*). La seconde se sert du courant précédemment déterminé pour calculer la vitesse du faisceau (*beam speed*).

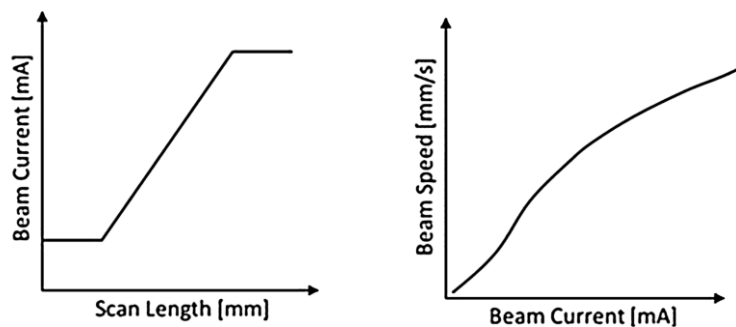


Figure 2.5 Fonctions de calcul de l'intensité et de la vitesse du faisceau d'électrons [Everhart & al. 2017]

Ces deux fonctions ne sont pas linéaires et la fonction qui détermine le courant est bornée par une valeur maximale et une valeur minimale. Ce phénomène est justifié par l'intensité maximale que peut produire le faisceau d'électrons et par l'intensité minimale qu'il faut pour que le faisceau soit stable et puisse être piloté correctement. Pour des longueurs trop grandes ou trop faibles de ligne de fusion, les paramètres ne sont donc pas attribués de manière optimale mais sont contraints par la machine.

Pour limiter l'impact que peuvent avoir ces contraintes, il est possible d'organiser différemment les pièces. Ainsi, pour éviter d'avoir de trop longues lignes de fabrication et risquer d'avoir un manque d'apport en énergie lors la fusion, le lot de pièces peut être séparé en plusieurs lots. Cela a aussi pour effet de rallonger le temps de fabrication. En fabriquant l'exemple de la Figure 2.4 en deux lots distincts, le faisceau a une trajectoire différente. La Figure 2.6 illustre ce phénomène avec le cube du milieu placé dans un lot différent.

Avec cette nouvelle configuration, les lignes de fusion sont plus courtes pour les couches paires. En revanche elles sont deux fois plus nombreuses que dans la configuration précédente. Le temps de balayage des couches paires sera conséquemment plus long car chaque ligne est parcourue dans un temps indépendant de sa longueur [Everhart & al. 2017].

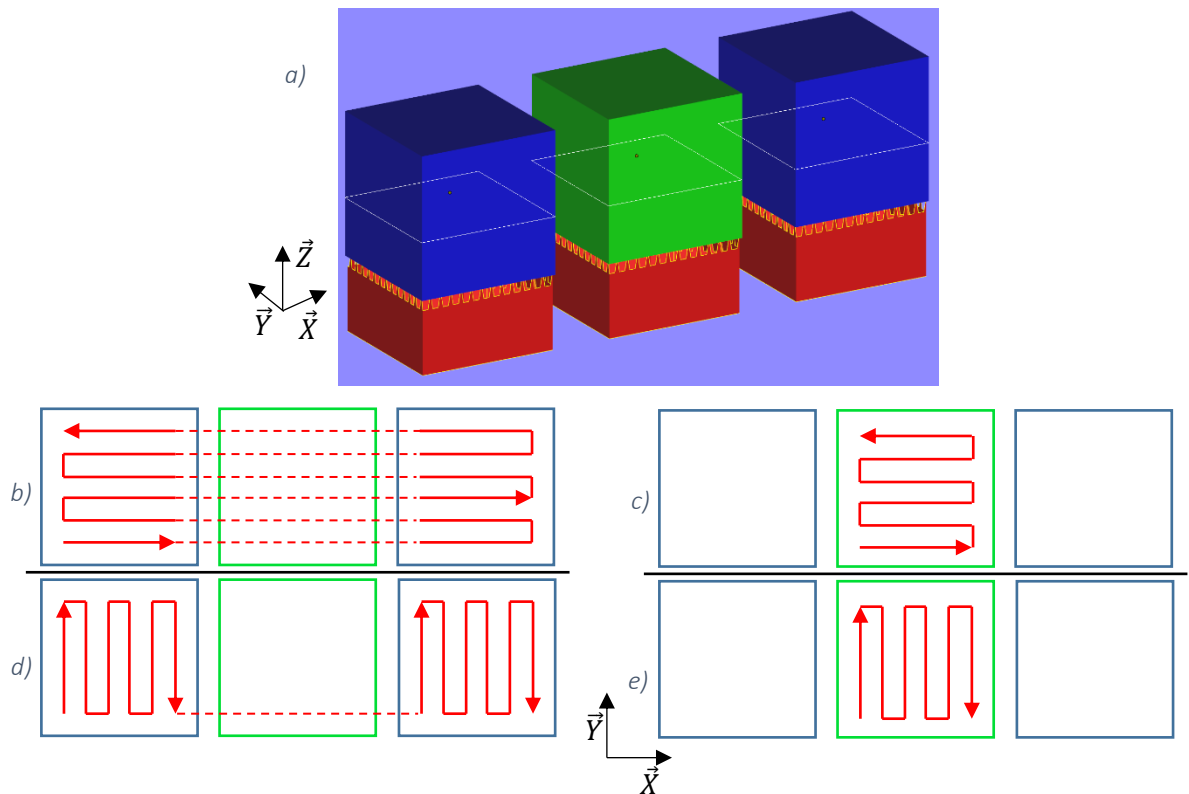


Figure 2.6 Représentation du chemin du faisceau d'électrons lors de la phase de hatching de deux lots de pièces (a) sur une couche paire pour le lot bleu (b) et le lot vert (c) puis sur une couche impaire pour le lot bleu (d) et le lot vert (e)

~ Wafer

La fabrication des supports se fait avec la même stratégie que les contours des pièces. Ils sont parcourus en *multispot* : le faisceau fusionne la poudre pour fabriquer les supports en plusieurs endroits simultanément. Contrairement au *contour* qui fond deux trajectoires concentriques, le *wafer* n'est constitué que d'une trajectoire. Les supports sont denses mais restent fins et peu résistants ce qui facilite leur retrait après fabrication et limite la perte de matière.

2.1.3 En aval de la fabrication

Lorsqu'une production se termine, le lot de pièces est noyé dans un bloc de poudre consolidée. Ce bloc est transféré dans une boîte à gants prévue à cet effet : le PRS (Powder Recovery System). Le PRS a pour fonction de séparer la poudre et les pièces. Il projette des grains de poudre sur le bloc afin de casser les cous entre les grains de poudre qui ont été consolidés. Ces grains sont alors libérés, captés et filtrés pour être réutilisés. A la fin de cette opération, il ne reste du bloc que les pièces et leurs supports.

L'étape suivante consiste donc à libérer les pièces de leurs supports. Cette étape est manuelle et peut demander un temps important en fonction de l'accessibilité et du nombre de supports. Si la poudre qui n'a pas été fondue est réutilisée, celle qui constitue les supports ne l'est pas et doit être recyclée. Les supports sont parfois nécessaires à la fabrication de pièces de bonne qualité, mais ils constituent un gaspillage de matière et mettent du temps à être fabriqués puis à être supprimés par la suite.

A ce stade du processus de fabrication, certaines pièces sont déjà utilisables. D'autres pièces nécessitent des opérations de finition pour améliorer leur état de surface ou ajuster leurs surfaces fonctionnelles. Il est également possible d'effectuer divers traitements pour modifier les propriétés physiques du matériau fabriqué.

2.2 Les défauts et limites du procédé EBM

Les défauts générés par la technologie EBM et qui ont pu être observés sur les pièces peuvent être distingués en plusieurs catégories. Ici, ces défauts et limites seront catégorisés en trois groupes. Le premier groupe porte sur les limites du procédé EBM. Le second groupe identifie les caractéristiques du procédé qui sont bénéfiques à la qualité des pièces (en comparaison avec les autres technologies de fabrication). Puis le troisième groupe s'intéresse aux défauts qui ont été observés occasionnellement avec la technologie EBM.

2.2.1 Les limites de la technologie EBM

2.2.1.1 La rugosité

La rugosité est obligatoirement importante pour les technologies de fabrication additive utilisant un lit de poudre, c'est encore plus le cas pour la technologie EBM qui ne peut pas utiliser des poudres de trop petites dimensions (non adaptées à la phase de consolidation). Cette limite est en grande partie générée par l'adhésion des poudres environnantes à la zone de fusion (par électro-statisme) : cela se manifeste visiblement sur la Figure 2.7. Un grand nombre de grains de poudre se trouvent alors collés en surface des pièces. Cela change cependant pour les surfaces orientées vers le haut de la machine ($\vec{Z}$). Puisque l'adhésion des grains de poudre se fait au niveau du contour de la couche lors de la fusion, lorsqu'une couche est fondue, il n'y a pas de poudre libre en dessus de la zone fondue. Il faut attendre le prochain ratissage pour que de la poudre soit à nouveau présente à ce niveau. La couche actuelle a alors largement eu le temps de se solidifier. Ainsi, lorsque la normale d'une surface est proche de l'axe de $\vec{Z}$, elle sera moins impactée par la rugosité induite par l'adhésion des poudres.

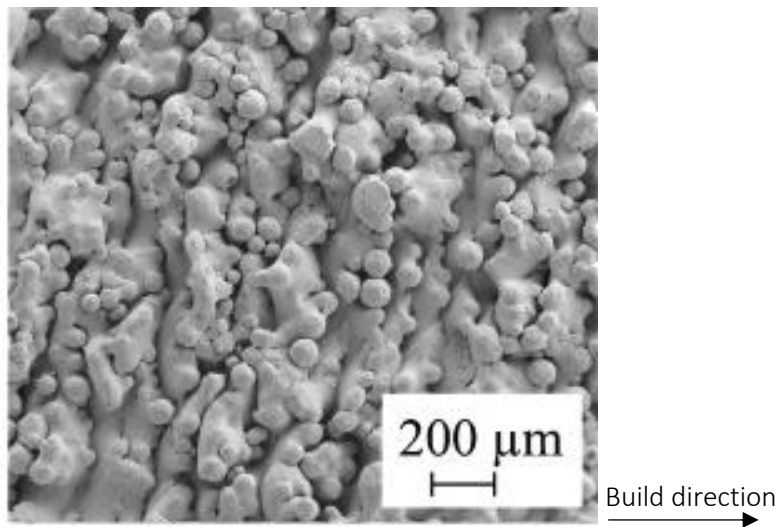


Figure 2.7 Surface verticale d'une pièce fabriquée par EBM vue par un microscope électronique à balayage [Karlsson & al. 2013]

La rugosité d'une surface est donc dépendante de l'orientation de cette surface dans l'enceinte de fabrication.

Il est intéressant de noter que la rugosité induite par le procédé EBM (comme la qualité géométrique des surfaces en général) est relativement complexe à mesurer et à interpréter. Les surfaces des pièces obtenues sont composées de cavités et de poudres partiellement fondues qui créent des reliefs complexes. C'est observable sur la Figure 2.8 b) où la courbe associée au profil peut avoir plusieurs altitudes pour une position donnée. Des exemples sont cerclés en rouge sur la courbe de la figure. Les outils de mesure et de calcul de rugosité conventionnels sont alors difficilement adaptables à ce type de surface. Ils ne décrivent pas la réalité de la complexité des surfaces observées.

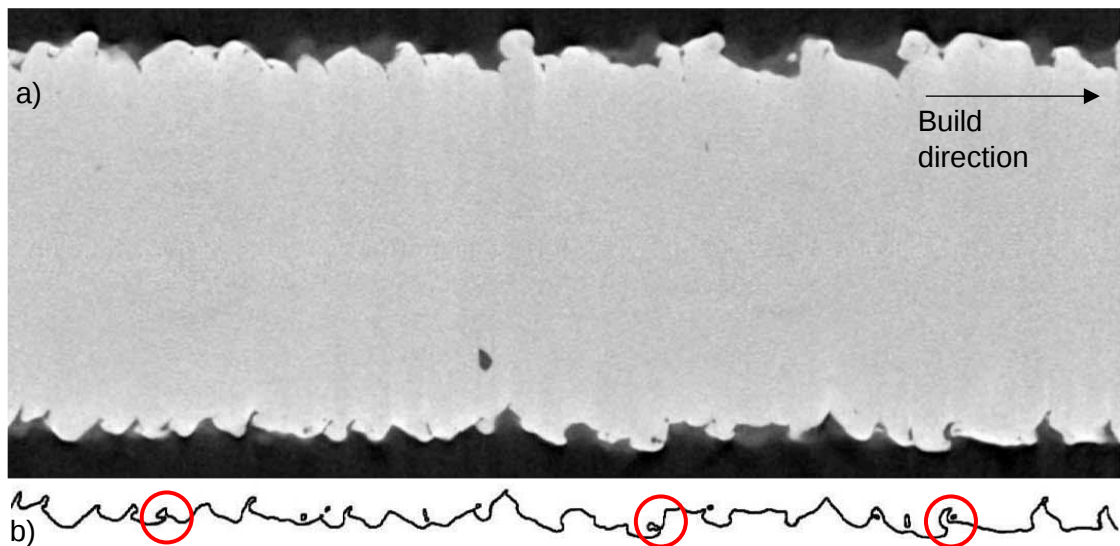


Figure 2.8 Coupe tomographique d'une poutre imprimée verticalement (a) et projection de la ligne inférieure de la coupe (b) [Persenot & al. 2018]

2.2.1.2 Autres défauts d'état de surface

La rugosité constitue donc une première limite du procédé EBM. Mais il existe d'autres phénomènes propres à ce procédé qui détériorent l'état de surface des pièces.

Sur une surface plane, orientée vers le bas de la machine, la rugosité a un impact important sur l'aspect des surfaces dites surplombantes. Mais, en plus du phénomène d'adhésion des poudres, la piscine de fusion d'une couche surplombante a tendance à pénétrer plus ou moins loin dans les couches de poudre inférieures. De ceci, il résulte un défaut d'état de surface encore plus important que celui engendré par la rugosité pour les surfaces surplombantes.

Le mauvais état de surface peut aussi être accentué par l'ajout de supports pendant la phase de préparation. Ces derniers, une fois arrachés, laissent une empreinte au niveau de leur jonction avec la pièce (au niveau des dents du support) qui dégrade l'état de la surface. Les supports sont attachés aux pièces au niveau de leurs surfaces surplombantes. Ces dernières sont déjà plus affectées par le procédé EBM que les autres, ajouter des supports peut davantage dégrader leur état de surface.

La rugosité et le mauvais état de surface des pièces affectent la tenue mécanique des matériaux en général. Mais les impacts sont encore plus accentués sur les matériaux architecturés. Dans ses travaux, Suard montre que la rugosité existe à plusieurs échelles [Suard & al. 2015]. En plus des poudres collées à la zone de fusion, une structure en « pile d'assiettes » apparaît sur les poutres verticales de petit diamètre, de l'ordre du millimètre (voir Figure 2.9). Ce phénomène a pour conséquence de léser les structures lattices de matière inefficace : matière qui ne transmet pas les efforts efficacement. Les structures sont alors moins résistantes qu'elles ne pourraient l'être à masse égale.

L'état de surface des pièces a un impact sur le comportement des matériaux en fatigue. Les études réalisées par Persenot montrent que la structure en « pile d'assiettes » (voir Figure 2.9 et Figure 2.8) crée des amorces de fissures tout au long de la poutre [Persenot & al. 2017]. Cela a pour effet d'affecter le comportement en fatigue des poutres et par extension des structures lattices. Ainsi, la charge et le nombre de cycle des essais en fatigue se trouvent réduits par la rugosité des poutres [Persenot & al. 2018 ; Rafi & al. 2013 ; Seifi & al. 2017].

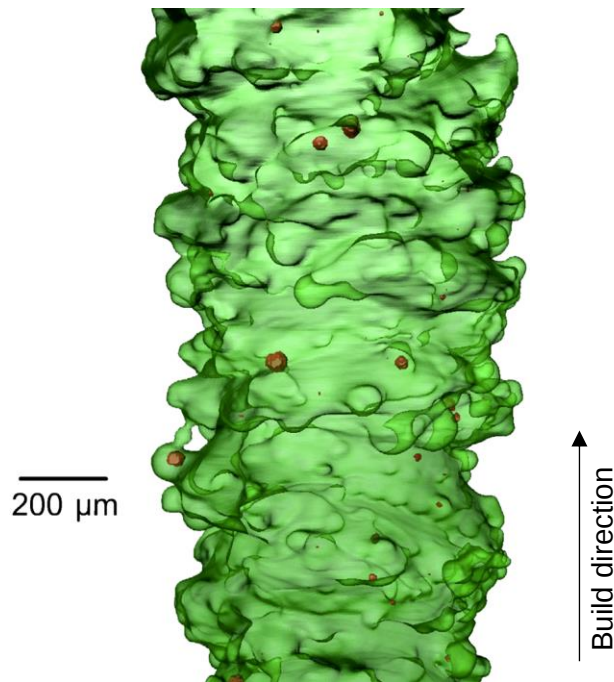


Figure 2.9 Tomographie reconstituée en 3D d'une poutre (de diamètre 1 mm) fabriquée verticalement avec la poutre en vert et les pores internes en rouge [Suard & al. 2015]

En outre, la rugosité impacte la préhension des pièces. A la manière des graines de bardane, les pièces sorties de machine s'accrochent facilement aux fibres textiles. Cela peut poser problème lorsqu'elles sont manipulées avec des gants (elles restent accrochées). Cette rugosité est aussi susceptible de dégrader les surfaces des pièces en contact. Le Ti-6Al-4V est plus dur qu'un grand nombre d'autres matériaux.

2.2.1.3 La porosité à pores sphériques

La porosité des pièces issues du procédé EBM est un défaut à la fois récurrent et occasionnel. Deux types de porosités se distinguent : les pores sphériques et les pores non sphériques [Galarraga & al. 2016]. Les pores sphériques sont récurrents et sont donc traités dans cette partie. Les pores non sphériques sont traités plus tard dans ce chapitre.

Un pore sphérique est à l'origine une bulle de gaz (argon) encapsulée dans un grain de poudre. Cette bulle est issue du procédé d'obtention des poudres [Yolton & Froes, 2015]. Sur la Figure 2.10, des exemples de grains de poudre poreux sont représentés. Ces pores ont des dimensions généralement comprises entre 0 et 70 µm.

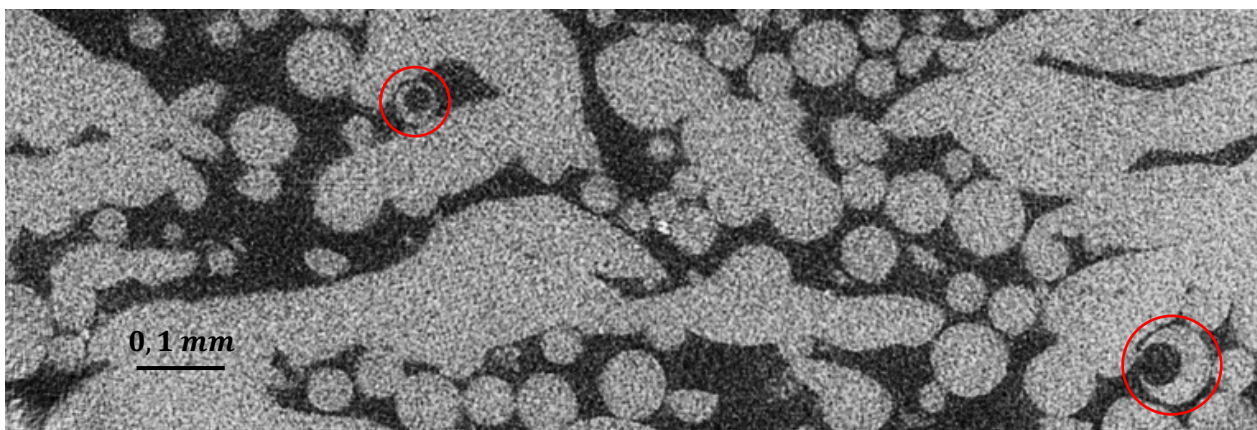


Figure 2.10 Image de tomographie d'une pièce poreuse avec pores sphériques (encerclés en rouge) et non sphériques

Certains de ces pores peuvent s'ouvrir lors de la phase de fusion. C'est le cas pour le pore sphérique situé en bas à droite sur la Figure 2.10. Lorsque la fusion de la poudre se produit de manière adéquate, la poudre est liquéfiée et ce pore disparaît. Dans cet exemple, les conditions de fusion ne permettent pas à la poudre d'être correctement fondue, cela explique que la bulle de gaz qu'elle contient se soit seulement ouverte.

La porosité finale induite par ce type de pore est peu variable, environ 0,1 % du volume de matière [Suard, 2015]. Ces pores ne représentent pas non plus un risque critique pour la santé matière des pièces. Leur forme, leur dispersion et leurs dimensions permettent de répartir les efforts de manière relativement homogène et ne créent pas de concentrations de contraintes ou d'amorces de rupture.

2.2.1.4 La composition chimique des pièces

La composition chimique des pièces est principalement influencée par la composition chimique de la poudre. Pour les poudres de Ti-6Al-4V et de Ti-6Al-4V ELI fournies par Arcam, la composition chimique est donnée dans le Tableau 2.1. L'alliage ELI (*Extra Low Interstitials*) contient moins d'éléments interstitiels (carbone, fer, oxygène et azote). La grande différence entre les deux alliages d'Arcam est le taux d'oxygène qui est plus faible dans l'alliage ELI. Cela a pour effet d'augmenter la ductilité, la ténacité et l'allongement à la rupture.

Tableau 2.1 Composition chimiques des poudres Arcam [Arcam, 2008a ; 2008b]

	<i>Al</i>	<i>V</i>	<i>C</i>	<i>Fe</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>H</i>	<i>Ti</i>
<i>Ti-6Al-4V</i>	6 %	4 %	0,03 %	0,1 %	0,15 %	0,01 %	0,003 %	Balance
<i>Ti-6Al-4V ELI</i>	6 %	4 %	0,03 %	0,1 %	0,10 %	0,01 %	< 0,003 %	Balance

Ces compositions chimiques sont vraies pour des poudres neuves, mais au cours de leur utilisation, dans la machine, et pendant les phases de recyclage, dépoudrage et stockage, ces compositions chimiques sont altérées. Les principales évolutions concernent les taux d'oxygène, d'aluminium et de vanadium. Pendant les phases de fabrication, l'énergie apportée à la poudre a tendance à vaporiser l'aluminium et le vanadium [Tang & al. 2015 ; Scharowsky & al. 2017]. Leur concentration dans le matériau est donc réduite au fur et à mesure de l'utilisation des poudres. Ces vapeurs sont ensuite retrouvées sur les parois d'éléments métalliques environnant l'espace de fabrication. Le taux d'oxygène en revanche est de plus en plus important au cours des fabrications [Tang & al. 2015]. En effet, les alliages de Ti-6Al-4V ont une tendance à facilement capter de l'oxygène. Cela a pour effet d'augmenter la limite élastique et la résistance à la rupture des pièces. En revanche, leur ductilité et leur ténacité seront réduites. Les poudres consolidées de l'espace de fabrication n'ont pas la même composition que les pièces qui ont été fondues et dont les taux de vanadium et d'aluminium sont réduits [Tang & al. 2015].

Les différents traitements thermiques qui ont lieu après fabrication n'affectent que très peu la composition chimique des pièces. Une relaxation ou une Compression Isostatique à Chaud (CIC) n'affectent pas la composition chimique des pièces en Ti-6Al-4V [Hrabe & al. 2017].

2.2.1.5 La péremption des poudres de Ti-6Al-4V

La composition chimique varie au cours du processus de fabrication pour les pièces fabriquées, mais c'est également le cas pour les poudres qui sont consolidées dans l'espace de fabrication. Ainsi, le taux d'oxygène augmente avec les cycles de réutilisation, alors que les taux d'aluminium et de vanadium restent relativement stables [Tang & al. 2015]. Réutilisée plusieurs fois, la poudre peut ne plus convenir à la fabrication de pièces avec une faible teneur en oxygène.

La sphéricité des poudres est également endommagée au cours des cycles. En effet, les cous créés entre les poudres lors du *preheat* sont ensuite cassés dans le PRS [Tang & al. 2015]. Les marques laissées par les cous à la surface des grains sont préjudiciables à leur sphéricité. Cela a également pour effet de réduire la taille des poudres dont le diamètre moyen diminue entre chaque utilisation [Strondl & al. 2015]. En revanche, le processus de recyclage des poudres a pour effet positif de séparer les poudres des satellites qui sont créés par le procédé d'obtention [Tang & al. 2015]. Le comportement et la rhéologie de la poudre recyclée dans l'espace de fabrication restent donc adéquats pour son utilisation dans la machine.

Le traitement des poudres recyclées (PRS + tamisation) permet d'éliminer les poudres trop fines, considérées comme poussières, et les poudres trop grosses, par exemple plusieurs poudres encore agglomérées. Ainsi, la taille des poudres diminue au cours des utilisations, même si les poudres trop petites sont éliminées [Strondl & al. 2015]. Cependant la réduction de la taille des poudres n'est pas un problème pour le procédé EBM jusqu'à des tailles 25-45 μm [Karlsson & al. 2013]. Cela a même pour effet d'améliorer l'état de surface (celui-ci étant principalement détérioré par l'agrégation de grains de poudre non fondus à la surface des pièces). Le principal risque avec la réduction de taille de la poudre ne concerne pas la qualité des pièces mais la manipulation et le stockage des poudres qui deviennent davantage sujettes à l'explosivité ainsi que la phase de *preheat* qui peut prendre plus de temps [Karlsson & al. 2013].

2.2.2 Avantages de la technologie EBM

Les limites que nous avons vues précédemment sont propres à la fabrication additive. Cependant l'utilisation de la technologie EBM apporte quelques avantages par rapport aux technologies laser. Plusieurs travaux s'intéressent aux propriétés des pièces réalisées par EBM et montrent que cette technologie permet d'avoir de très bons résultats.

2.2.2.1 Les contraintes résiduelles

Pendant le procédé EBM, le faisceau d'électrons apporte beaucoup d'énergie pour faire fondre la matière. Cette matière redescend en température et se solidifie rapidement. Ce phénomène peut générer des contraintes résiduelles dans le matériau. C'est le cas pour les procédés lasers par exemple [Mercelis & Kruth, 2006].

En revanche, pour le procédé EBM, les contraintes résiduelles sont beaucoup plus faibles [Sames & al. 2016]. En témoignent des études comparatives entre des pièces sorties de machine et des pièces relâchées [Hrabe & al. 2017]. Les propriétés des éprouvettes sont semblables avant et après le traitement thermique pour des essais mécaniques de traction, de compression ou des essais en fatigue. Ces résultats s'expliquent par la température maintenue haute ($> 650\text{ }^{\circ}\text{C}$) tout au long du procédé.

2.2.2.2 La structure et le comportement du matériau

Comme pour d'autres technologies de fabrication additive, la machine EBM fabrique les pièces couche par couche. Cela a pour conséquence de créer un gradient de température important : la dernière couche fabriquée est généralement plus chaude que les couches inférieures ; ces dernières ont eu plus de temps pour refroidir. Or un gradient de température est un facteur important d'orientation de la croissance des grains dans le métal. La structure du matériau devrait donc être orientée dans le cas de l'EBM. C'est le cas pour les pièces en superalliages à base nickel. Le gradient de température important et la composition de l'alliage favorise une croissance de grains colonnaires orientés selon l'axe de fabrication dans le matériau ce qui se traduit par une anisotropie du matériau [Chauvet & al. 2017].

Cependant, pour le Ti-6Al-4V, le maintien de l'espace de fabrication à une température élevée ($>650\text{ }^{\circ}\text{C}$) permet un refroidissement plus lent. Il agit même comme un recuit qui efface l'historique thermique de la pièce. La microstructure du matériau est donc équiaxe dans les conditions standards de fabrication. Sans ce

refroidissement lent, l'alliage ne serait présent que sous une forme allotropique : la phase β qui est stable au-delà de 882 °C. Mais ce refroidissement lent permet un mélange des deux formes allotropiques du Ti-6Al-4V α et β . Tout cela confère des comportements relativement semblables au matériau dans toutes les dimensions et favorise donc l'isotropie du matériau [Tan & al. 2015].

Il est cependant possible d'orienter la croissance des grains en modifiant les stratégies de fusion [Chauvet & al. 2017 ; Sames & al. 2016 ; Dehoff & al. 2015], ce point est abordé dans la partie 2.4.3 du chapitre.

2.2.3 Les défauts observés

2.2.3.1 Les défauts de forme

Dans cette partie, nous nous intéressons aux défauts de forme des surfaces fabriquées. Plusieurs de ces défauts ont été répertoriés au cours des fabrications.

Le premier défaut de forme sur les surfaces concerne les pièces denses composées de surfaces verticales par rapport à l'orientation dans l'espace de fabrication (i.e. $\vec{Z}$ est un vecteur du plan). Ce phénomène est d'autant plus marqué lorsque les surfaces verticales sont connectées avec une surface en porte-à-faux. Comme le montre la Figure 2.11, une perte de bord est effective sur les premières couches fabriquées puis s'atténue couche après couche jusqu'à ne plus être perceptible. Cette perte de bord est générée par un retrait itératif des couches : la première couche est fabriquée dans un état dilaté, elle se rétracte un peu en refroidissant. Puis la seconde est fabriquée et refond la première et les deux couches se rétractent. De cette manière, le retrait itératif des couches crée une perte de la verticalité des surfaces adjacentes au surplomb [Cheng & al. 2014 ; Villar Sanjurjo, 2015]. Les observations de ce défaut montrent qu'il apparaît sur les premiers millimètres d'une surface verticale et disparaît ensuite. Il est souvent observable sur les surfaces surplombantes jointes à une partie massive de la pièce (comme sur la pièce Figure 2.11) mais il arrive de l'observer aussi sur la première surface d'une pièce massive.

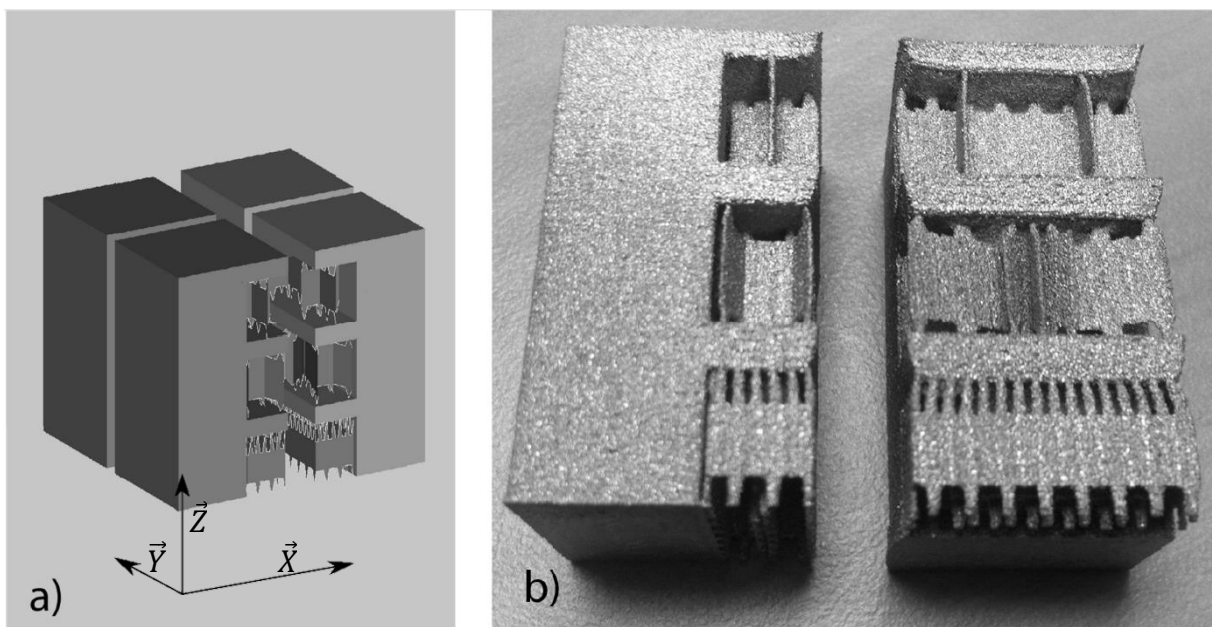


Figure 2.11 Exemple de perte de bord entre une géométrie conçue (a) et fabriquée (b) [Dinwiddie & al. 2013]

Un second défaut de forme apparaît principalement pour des pièces volumineuses avec des surfaces surplombantes (Figure 2.12) mais également pour des géométries plus fines lorsqu'elles sont mal supportées (Figure 2.13). Ce défaut montre une déformation des couches fabriquées (sur la Figure 2.12) qui ne sont plus

planes à proximité du bord de la pièce. Ce défaut peut être lié à plusieurs phénomènes tels que le ratissage, un mauvais supportage, un excédent d'apport énergétique, etc.

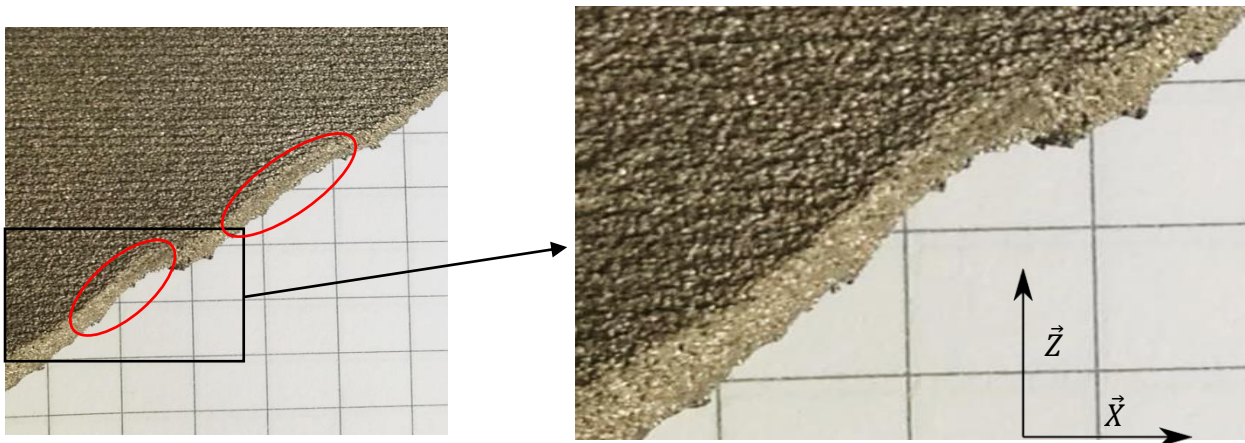


Figure 2.12 Exemple de défaut pour un volume en porte-à-faux : les couches sont déformées et la matière est déplacée créant un vide (entouré en rouge) par rapport à la géométrie conçue

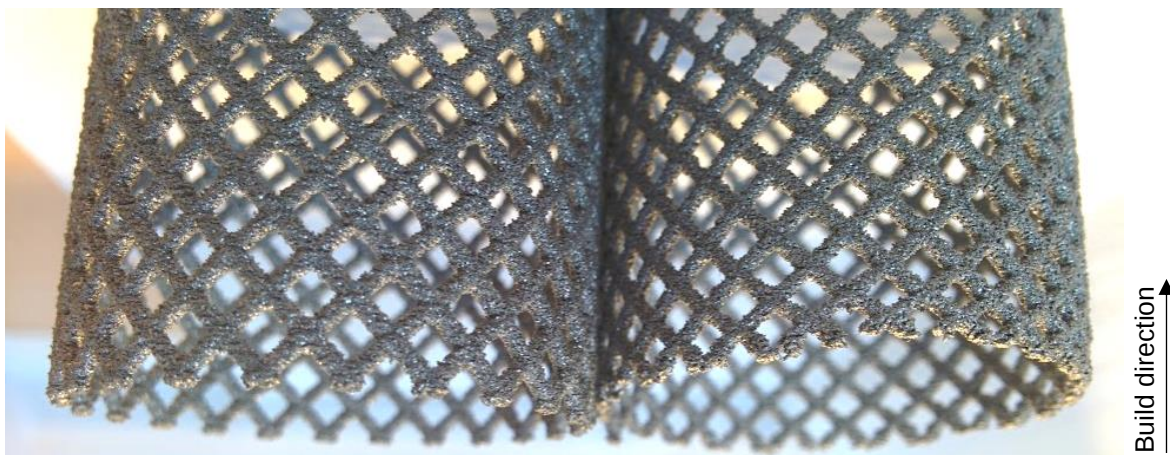


Figure 2.13 Exemple de défaut pour un volume architecturé observable sur une pièce défectueuse (droite) comparée à une pièce saine (gauche)

Les surfaces surplombantes sont également sujettes à des déformations lors de la fabrication. Dans les cas précédents, une absence de matière a été observée. Dans ce cas, la matière est présente là où elle n'est pas attendue. Les exemples de la Figure 2.14 illustrent ce type de défaut sur des volumes en porte-à-faux.

En plus d'être une déformation significative (parfois plusieurs millimètres), ce phénomène est nuisible au bon déroulement de la fabrication. La surélévation des surfaces surplombantes peut rentrer en contact avec les dents du râteau. Ces dents peuvent alors se déformer et rompre, et ne plus apporter une quantité adéquate de poudre. Si trop de poudre est apportée dans l'espace de fabrication, le faisceau d'électrons ne sera pas capable de consolider la poudre. Les poudres libres peuvent alors s'envoler dans toute l'enceinte de la machine lors de la phase de *melt*, ce phénomène est appelé *smoke*. Dans le meilleur des cas, la machine détecte le *smoke* et s'arrête, mais il est possible que des poudres viennent se déposer dans la colonne du faisceau et la boucher. Il faut alors nettoyer intégralement tous les éléments de la partie supérieure de la machine pour éliminer toute trace de poudre.

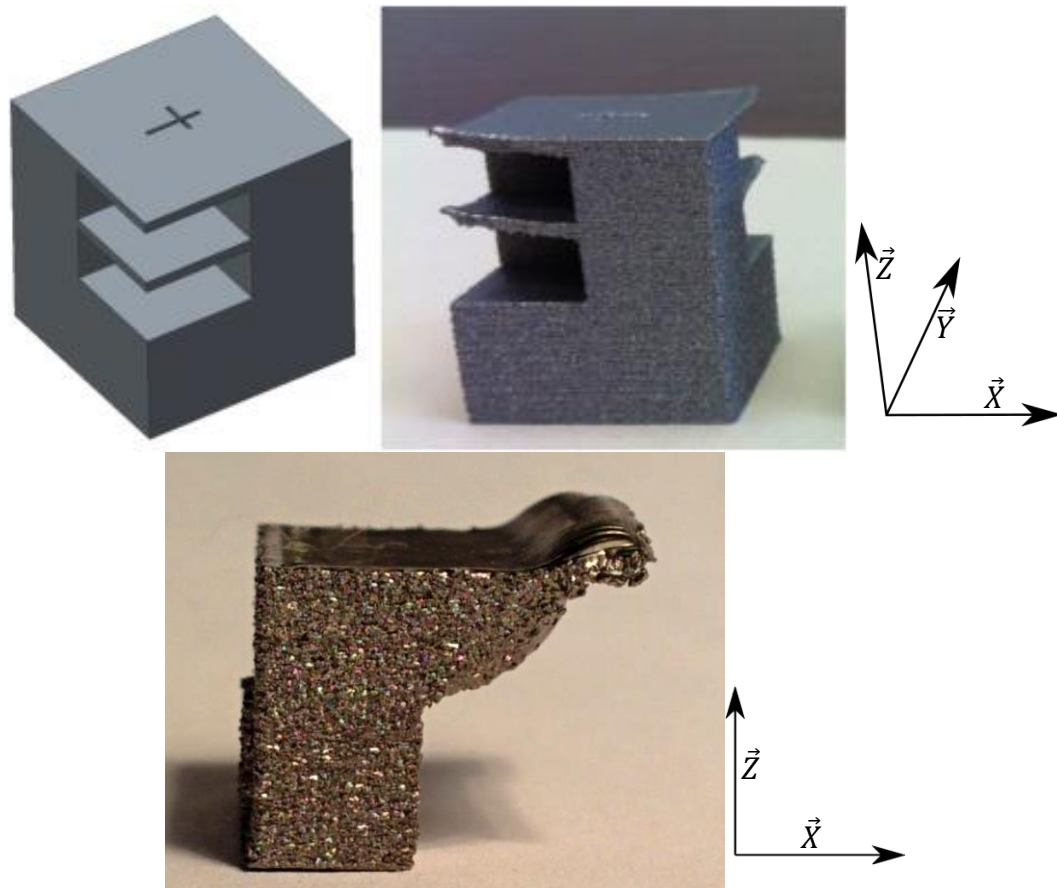


Figure 2.14 Exemples de déformation d'une surface surplombante
[Cheng & Chou, 2015 ; Villar Sanjurjo, 2015]

2.2.3.2 La délamination

La délamination désigne dans notre cas une ou plusieurs couches mal ou non fondues. Cela se produit pendant la phase de fabrication, plus précisément pendant la phase de *hatching* et peut être générée par plusieurs causes. Toutes n'ont pas été étudiées mais il existe aujourd'hui plusieurs causes observées ou supposées.

La première concerne la qualité du maillage des pièces CAO. Lorsque les fichiers de CAO sont manipulés et reformatés, il arrive que certaines informations soient mal enregistrées, déformées. Avec les formats stl, amf ou 3mf, cela engendre des défauts tels qu'un triangle manquant, un triangle inversé, des triangles qui se coupent, etc. Si ce défaut n'est pas corrigé pendant la phase de préparation, il est difficilement détectable a posteriori. Ce phénomène est illustré Figure 2.15 avec un cube dont deux triangles du fichier sont manquants et la couche générée visualisée par l'interface du trancheur (Build Assembler 3). La pièce qui aurait alors été fabriquée n'aurait pas été celle attendue. Dans ce cas précis, le défaut est visible lors de la préparation des pièces et il peut être détecté dans l'interface du trancheur. Mais lorsque les triangles sont de taille submillimétrique, une erreur est difficilement détectable. Il en va de même lorsque les pièces et géométries sont complexes.

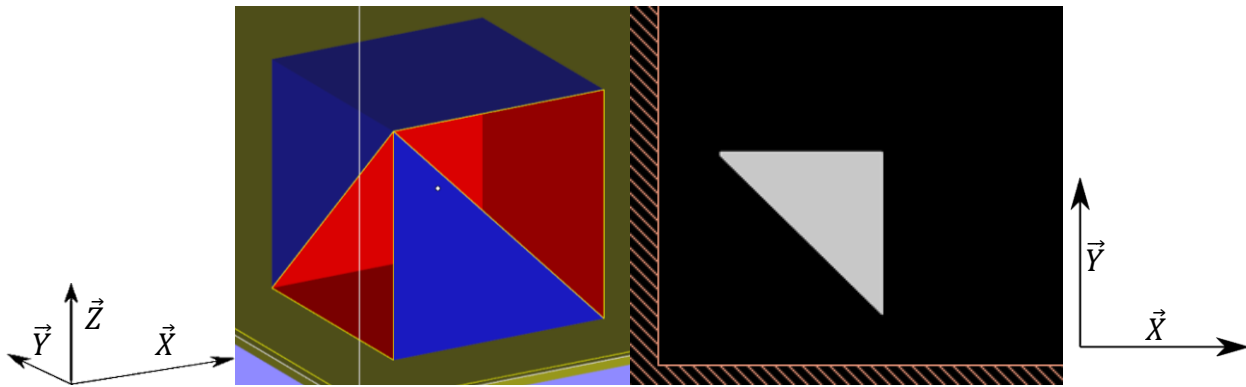


Figure 2.15 Exemple de défaut dans le fichier stl (gauche) et son impact sur la génération de couche (droite)

La seconde cause est liée au procédé de fabrication. Un mauvais paramétrage du faisceau d'électrons peut par exemple provoquer ce type de défaut. La Figure 2.16 illustre un cas extrême de délamination généré par des conditions de fusion insuffisantes. Cette pièce présente l'avantage d'avoir un défaut facilement identifiable par une inspection visuelle. En revanche, lorsque ce défaut n'est pas débouchant sur l'extérieur de la pièce, il est plus difficile à détecter. Ce type de défaut est impactant sur le comportement mécanique des pièces, sa détection est conséquemment nécessaire.



Figure 2.16 Exemple de délamination d'une pièce sur plusieurs couches [Sames & al. 2016]

2.2.3.3 La porosité à pores non sphériques

Les pores non sphériques (le reste des espaces sombres sur la Figure 2.10) sont générés par de mauvaises conditions de fusion [Galarraga & al. 2016]. Contrairement aux pores sphériques qui sont répartis dans des proportions peu variables : environ 0,1 % du volume [Suard, 2015], les pores non sphériques peuvent être présents dans des proportions très variables. Ainsi, une pièce correctement fondue ne contiendra aucun pore non sphérique.

La Figure 2.10 est un exemple volontairement extrême de pièce poreuse. La Figure 2.17 illustre les géométries et caractéristiques des pores non sphériques dans des zones de pièce fabriquée par *hatching*. Deux paramètres sont importants : les pores non sphériques peuvent être plus étendus que les pores sphériques mais ils restent relativement plats et ne s'étendent pas de manière homogène dans les trois dimensions. En effet, ils se forment pendant la phase de *hatching*, et sont donc parallèles au plan de fabrication. Pour faciliter

la compréhension, nous faisons dans la suite du document un abus de langage en appelant ces pores non sphériques : pores plans.

Les Figure 2.10 et Figure 2.17 montrent que les pores plans peuvent être beaucoup plus grands que les pores sphériques. Certains contiennent même des grains de poudre libres et non fondus dans leur volume. De plus, ils sont beaucoup plus nocifs pour les propriétés mécaniques des pièces [Galarraga & al. 2016] ainsi que pour leur comportement en fatigue [Tammis-Williams & al. 2017].

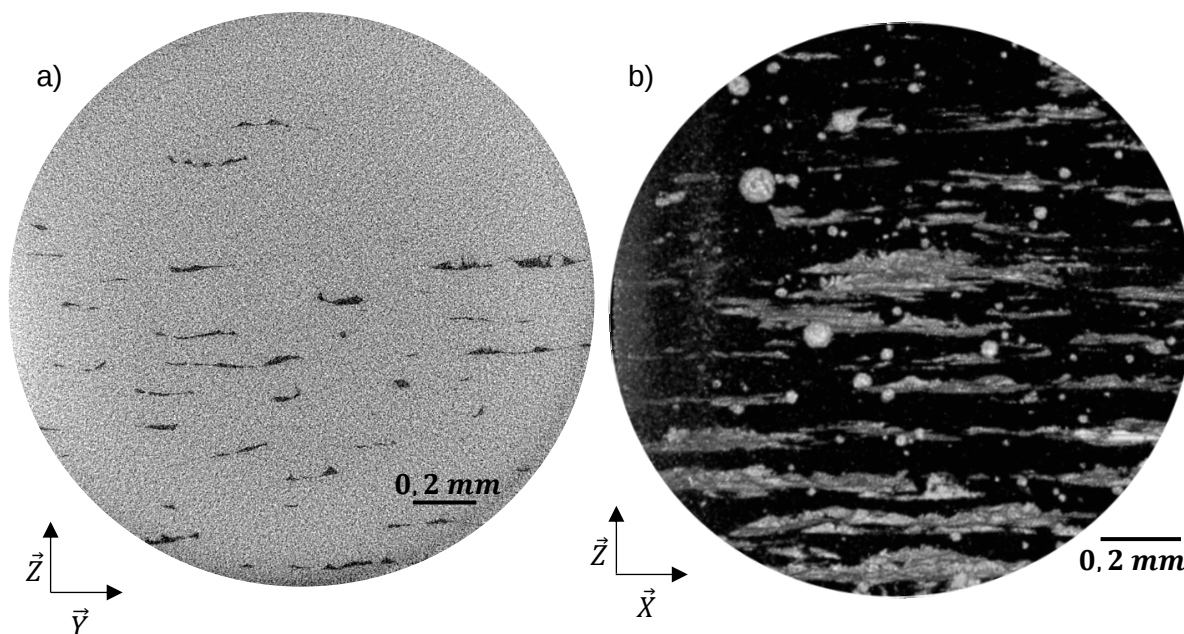


Figure 2.17 Exemple de pièce poreuse vue a) en coupe (pores en noir) et b) en 3D (pores en blanc)

Les premières couches fabriquées d'une pièce, notamment les couches qui suivent une surface surplombante, contiennent souvent des pores plans générés par la *thickness function* (qui réduit l'énergie apportée aux couches surplombantes) et la conductivité thermique réduite des couches de poudre en dessous. Il a été observé que jusqu'à 500 μm de matière étaient impactées par ce phénomène. Cette donnée est confirmée par la littérature et les études réalisées par Dinwiddie & al. [Dinwiddie & al. 2013].

Il est possible que le faisceau soit interrompu de manière non contrôlée pendant le procédé. Cela arrive par exemple lorsque la poudre n'est pas correctement consolidée lors de la phase de *preheat* et qu'un ou plusieurs grains de poudre remontent dans la colonne au cours du procédé. La présence de grains dans la colonne peut conduire à l'apparition d'arcs électriques dans cette colonne. Cela a pour conséquence de faire monter la température au sein de la colonne ainsi que de couper le faisceau. Si la température ne s'élève pas trop, le faisceau peut être redémarré, sinon la production est définitivement interrompue. Dans le cas où le faisceau redémarre, l'instruction en cours lors de la coupure est abandonnée et le processus reprend au début de la couche en cours. Si la coupure a lieu alors que le processus de réalisation de la couche était avancé, alors il est possible d'observer de la porosité là où la matière aura été fondue à deux reprises.

2.3 Contrôler la qualité tout au long du procédé

Pour s'assurer de maîtriser la qualité des pièces en fabrication additive, il est également nécessaire de le faire tout au long du procédé. En effet, si les pièces fabriquées sont défectueuses, il faut pouvoir identifier la cause du défaut. Cela permet d'une part de comprendre comment le défaut s'est formé et ensuite de caractériser ce défaut et sa cause pour mieux s'en éloigner. En outre, détecter un défaut au plus tôt permet de limiter la non-qualité et par extension le coût de revient d'une pièce.

Dans cette partie, nous nous intéressons au contrôle de la qualité pendant la phase de fabrication. Le contrôle de la phase de fabrication est un sujet qui suscite énormément d'intérêt dans la littérature et la communauté scientifique. Dans le but de mieux maîtriser le procédé EBM, de nombreuses machines Arcam ont par exemple été instrumentées. L'instrumentation d'une machine permet d'acquérir des informations in situ comme la température des couches, le bon fonctionnement du faisceau ou encore la présence de pores. Il existe actuellement plusieurs solutions pour instrumenter une machine EBM, de nombreux instituts de recherche qui s'y sont intéressés ont opté pour construire une petite enceinte de fabrication à l'intérieur d'une machine afin de gagner de la place pour l'équipement, d'autres ont choisi de conserver la machine intacte et d'utiliser d'autres outils pour l'instrumenter. Enfin, de nouveaux constructeurs proposent des machines pensées pour être instrumentées.

Une autre technique de contrôle de la phase de fabrication est étudiée dans la littérature, elle consiste à insérer des éléments dans le lot de fabrication qui seront fabriqués avec les pièces. Ces éléments stockent l'information de la fusion lors de leur fabrication et leur analyse permet de révéler certaines informations. Ces éléments sont des traceurs de la qualité qui sont ensuite analysés pour extraire l'information qu'ils contiennent.

Enfin, la validation des propriétés de fabrication d'une machine peut être faite avec des pièces de test standardisées. C'est le dernier aspect abordé dans la partie contrôle de la phase de fabrication.

2.3.1 Instrumentation des machines de fabrication

L'instrumentation d'une machine consiste à équiper une machine de capteurs de toutes sortes. Les instrumentations se scindent en deux principales catégories, les caméras qui permettent d'observer la couche de poudre, et les autres systèmes qui mesurent les paramètres du faisceau. Everton & al. font, dans une revue de la littérature publiée en 2016 dans Materials and Design [Everton & al. 2016], un inventaire très complet des moyens disponibles pour faire du contrôle in situ. Ils s'intéressent particulièrement aux solutions permettant de détecter voire de corriger les défauts pendant la fabrication. Cette partie a en effet la particularité de présenter un outil de contrôle mais aussi un excellent moyen d'améliorer la fabrication lorsqu'il est utilisé pour piloter le faisceau d'électrons.

Dans cette partie, plusieurs solutions d'instrumentation identifiées par Everton & al. [Everton & al. 2016] et d'autres plus récentes sont exposées.

2.3.1.1 Caméras

Dans la catégorie des caméras, plusieurs sous-catégories associées à différentes technologies d'acquisition d'image se distinguent : les caméras optiques, thermiques (infrarouge) et les systèmes dédiés, spécifiques aux machines.

~ *Caméras optiques*

La caméra optique est le procédé le plus standard d'instrumentation des machines. Une caméra optique (LayerQam™) est instrumentée dans la machine Arcam A1. Elle permet d'observer l'avancement des couches et le passage du faisceau d'électrons. En utilisant les images, différents phénomènes sont observables, tels

que le manque de fusion qui génère des pores plans. La caméra optique est cependant sujette à plusieurs contraintes.

La première d'entre elles est la métallisation (i.e. la solidification de l'aluminium et du vanadium vaporisés pendant la fabrication) sur les parois de la machine. La solution adoptée par Arcam pour limiter son impact consiste à placer un film protecteur devant la vitre de la caméra, sur lequel vient se faire la métallisation. Ce film protecteur est déroulé tout au long du procédé pour avoir une couche de métallisation la plus faible possible.

La seconde contrainte concerne la perturbation de la caméra par les ondes émises par la poudre. En effet, lors de la fabrication, la poudre fondue émet d'importantes quantités de rayons X et Infrarouge qui perturbent l'image. C'est d'autant plus vrai lorsque l'objectif est d'observer la piscine de fusion.

L'un des intérêts de l'instrumentation des machines de fabrication est de contrôler en temps réel la piscine de fusion. Or, dans le cas de l'EBM, la piscine de fusion se déplace à une vitesse élevée. Un dispositif mécanique ne permet pas à la caméra de suivre la piscine de fusion. Il faut donc que la caméra capte l'ensemble du lit de poudre avec une précision suffisamment importante pour observer la piscine de fusion.

~ Caméras thermiques

Les caméras thermiques présentent un avantage important par rapport aux caméras optiques. Il a été vu que lors de la fabrication, le faisceau d'électrons vaporise une partie de la poudre et cette vapeur se condense sur les parois de la machine. Il arrive que cette métallisation se fasse à la surface du verre qui sépare la caméra de la chambre de fabrication et qu'elle masque le champ de vision de la caméra [Dinwiddie & al. 2013]. Les rayonnements infrarouges traversent sans problème ce dépôt métallique, les caméras thermiques sont donc moins sujettes à ces perturbations [Dinwiddie & al. 2013]. En outre, beaucoup des phénomènes qui parasitent les rayonnements et les caméras infrarouges sont (dans le cas de l'EBM) corrigibles par des algorithmes de traitement d'images [Raplee & al. 2017b].

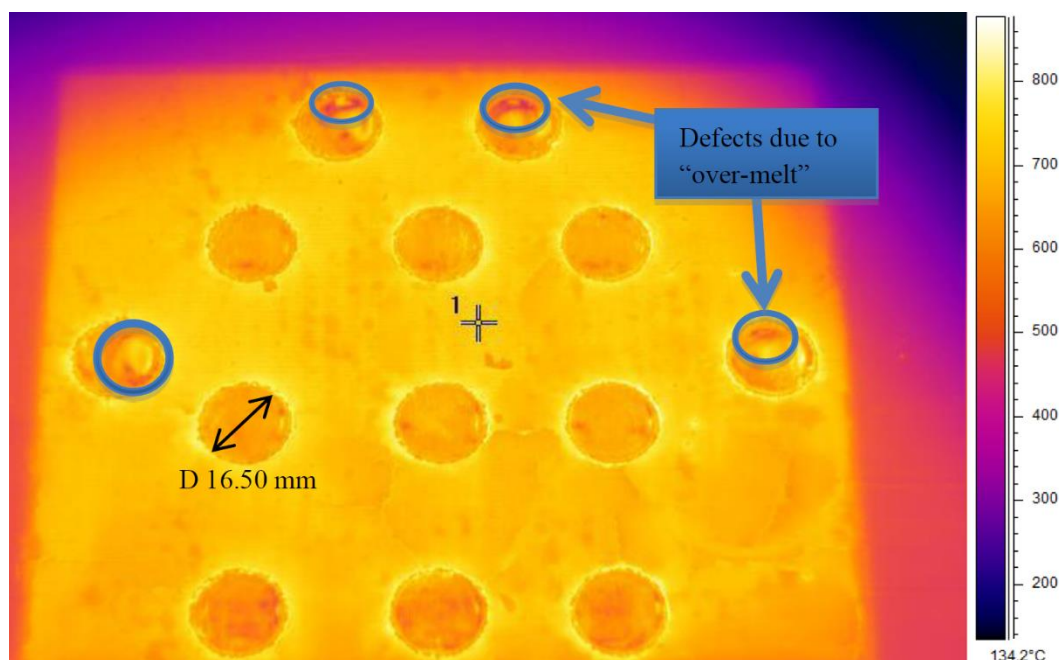


Figure 2.18 Image faite avec une caméra infrarouge dans une machine EBM illustrant des défauts de surchauffe [Rodriguez & al. 2012]

Comme les caméras optiques, les caméras thermiques permettent de qualifier la surface du lit de poudre et détecter en partie le manque de fusion. Un équipement thermique offre une cartographie thermique de la

couche, cela permet aussi de détecter la surchauffe de la matière. En général, un équipement thermique permet de mieux comprendre l'apport énergétique transmis par le faisceau d'électrons à la poudre et la manière qu'a l'énergie de se dissiper dans la matière et dans la poudre [Raplee & al. 2017b].

Les caméras thermiques permettent également de mieux comprendre la microstructure et de prévoir la formation des grains dans la pièce. En récoltant la thermique de chaque couche, il est possible de créer un modèle qui intègre le gradient thermique de chaque pièce. Et le gradient est l'élément qui détermine la direction de croissance des grains. Avec des algorithmes adaptés, il est possible de prédire la direction dans laquelle vont croître les grains colonnaires (ou équiaxes si le gradient est faible) [Raplee & al. 2017a].

En général, les caméras sont utilisées après le passage du faisceau d'électrons pour limiter la perturbation due à la piscine de fusion qui génère beaucoup de lumière (dans le domaine visible et dans l'infrarouge). En revanche, utiliser une caméra pendant la fabrication présente l'avantage de suivre la piscine de fusion en temps réel. Aucune caméra instrumentée ne permet encore d'acquérir rapidement des images suffisamment précises pour suivre la piscine de fusion mais il s'agit d'un des axes d'amélioration dans l'instrumentation des machines [Dinwiddie & al. 2016].

2.3.1.2 Systèmes complexes d'analyse in situ

Les systèmes présentés utilisent la source d'énergie comme source de « lumière » ainsi qu'une combinaison d'instruments pour faire l'acquisition d'images.

Pour la technologie SLM, une des solutions consiste à analyser les ondes émises par la piscine de fusion à l'aide de plusieurs équipements (voir Figure 2.19). Une caméra optique permet de mesurer la taille de la piscine de fusion, et une photodiode est utilisée pour mesurer l'intensité des ondes émises. Cette instrumentation permet de corriger en temps réel les paramètres pour maintenir une piscine de fusion de taille constante et idéale [Berumen & al. 2010]. La caméra et la diode captent les ondes orientées par le même miroir (*scanner mirror* sur la figure) qui oriente le laser, elles peuvent ainsi profiter d'un puissant zoom sur le lit de poudre et s'assurer de toujours suivre la piscine de fusion.

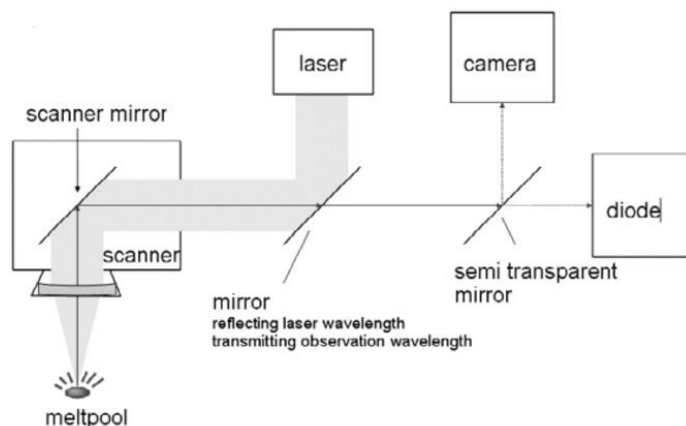


Figure 2.19 Schéma d'instrumentation d'une machine SLM [Berumen & al. 2010]

Récemment les caméras optiques ont permis l'obtention de tels résultats pour la technologie EBM [Riedlbauer & al. 2017]. Dans une A1, la piscine de fusion se déplace à une vitesse beaucoup plus importante que dans le cas du SLM, sa durée de vie est plus faible et son observation plus contrainte : la température très élevée, l'émission de rayons X, la métallisation ou le vide sont des facteurs contraignants [Riedlbauer & al. 2017]. L'instrumentation d'une caméra capable de réaliser une acquisition d'image de qualité semblable à celle du laser et dans un temps suffisant pour qualifier la piscine de fusion en temps réel n'est pas encore atteignable avec les technologies disponibles.

En revanche, il est possible d'obtenir des résultats intéressants en utilisant les électrons réfléchis à la surface du lit de poudre. Les travaux actuels se penchent sur l'utilisation des électrons secondaires et rétrodiffusés pour analyser la surface fondue. Les techniques d'acquisition d'images consistent à scanner, avec le faisceau d'électrons, la couche qui vient d'être fabriquée [Wong & al. 2018]. Ce scan est fait en utilisant un thème particulier (dérivé du thème *preheat*) qui balaye la surface du lit de poudre avec une faible énergie, l'acquisition se fait en analysant les électrons secondaires et rétrodiffusés issus du balayage à l'aide de capteurs.

Ce type d'analyse se révèle efficace et l'instrumentation des machines commence à se préciser. Dans le cas de l'étude présentée par Wong [Wong & al. 2018], il s'agit d'une instrumentation faite à l'aide de capteurs ajoutés à la colonne déjà existante d'une machine EBM. Mais il existe d'autres solutions d'instrumentation à l'étude. Un exemple notoire est la colonne du canon à électrons ATHENE (Additive Technology Housing Equipped with New Electron gun¹) qui combine des capteurs pour les électrons réfléchis et un système d'imagerie optique [Osmanlic & al. 2018]. Cette colonne présente l'avantage de détecter la porosité mais elle dispose également de solutions pour piloter le faisceau d'électrons et éliminer les zones non fondues.

2.3.2 Traceurs de qualité

Les traceurs de qualité sont des géométries insérées dans l'espace de fabrication d'un lot dans le but de qualifier la qualité dudit lot. Ils peuvent servir à tracer différents critères de qualité selon leur forme, leur disposition dans le lot, ou encore selon les analyses réalisées sur ces traceurs après fabrication.

Fréquemment des témoins sont utilisés pour caractériser l'aspect résistance mécanique du matériau. Ces témoins sont généralement conçus pour devenir des éprouvettes de traction, ils peuvent être conçus avec la géométrie définitive de l'éprouvette ou avec une surépaisseur en vue d'être usinés.

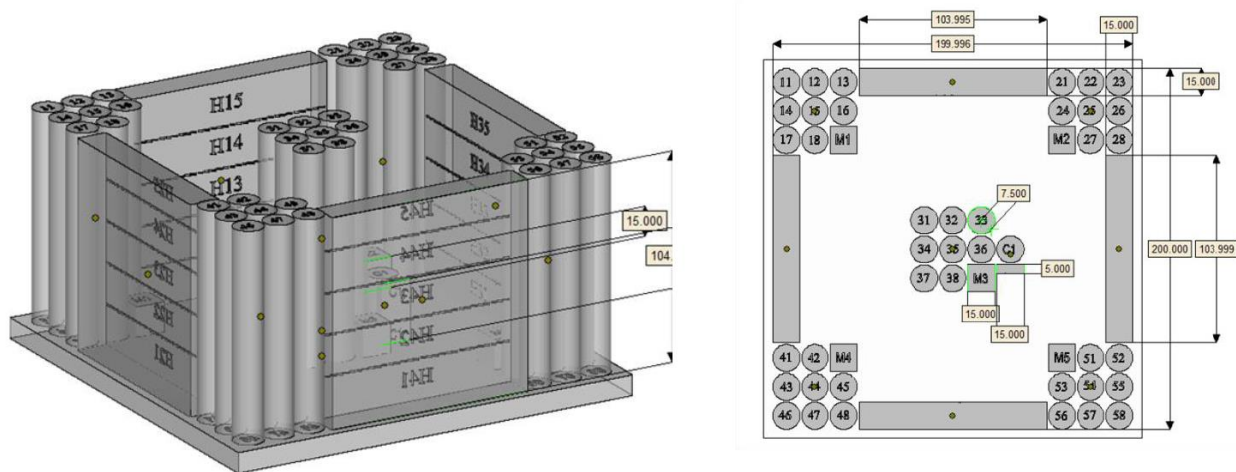


Figure 2.20 Lot d'éprouvettes utilisé par Arcam pour caractériser un matériau et évaluer une paramétrie [Bahdou, 2018]

Lorsque les témoins sont fabriqués seuls, sans autre pièce dans le lot de fabrication, il est possible de définir un référentiel de qualité. L'hypothèse alors faite est : si les témoins sont fabriqués avec les mêmes propriétés dans les lots d'après, alors les pièces auront également les propriétés attendues. Certains se servent aussi de cette méthode pour qualifier des matériaux et des paramétries. C'est le cas d'Arcam qui utilise une configuration définie (voir Figure 2.20) pour réaliser ses tests. Il faut noter que les éprouvettes fabriquées par Arcam sont fabriquées avec les surépaisseurs en vue d'être usinées.

¹ Développée par pro-beam et l'Université Friedrich-Alexander d'Erlangen-Nuremberg [Osmanlic & al. 2018]

Il est également possible d'utiliser des traceurs pour caractériser de nombreux autres critères de qualité. Dans la proposition de Portolès & al. pour la qualification de lots de fabrication (représentée sur la Figure 2.21), plusieurs types de traceurs sont utilisés : des traceurs de composition chimique pour identifier le taux d'oxygène ainsi que des traceurs mécaniques pour la microstructure et divers tests mécaniques [Portolès & al. 2016].

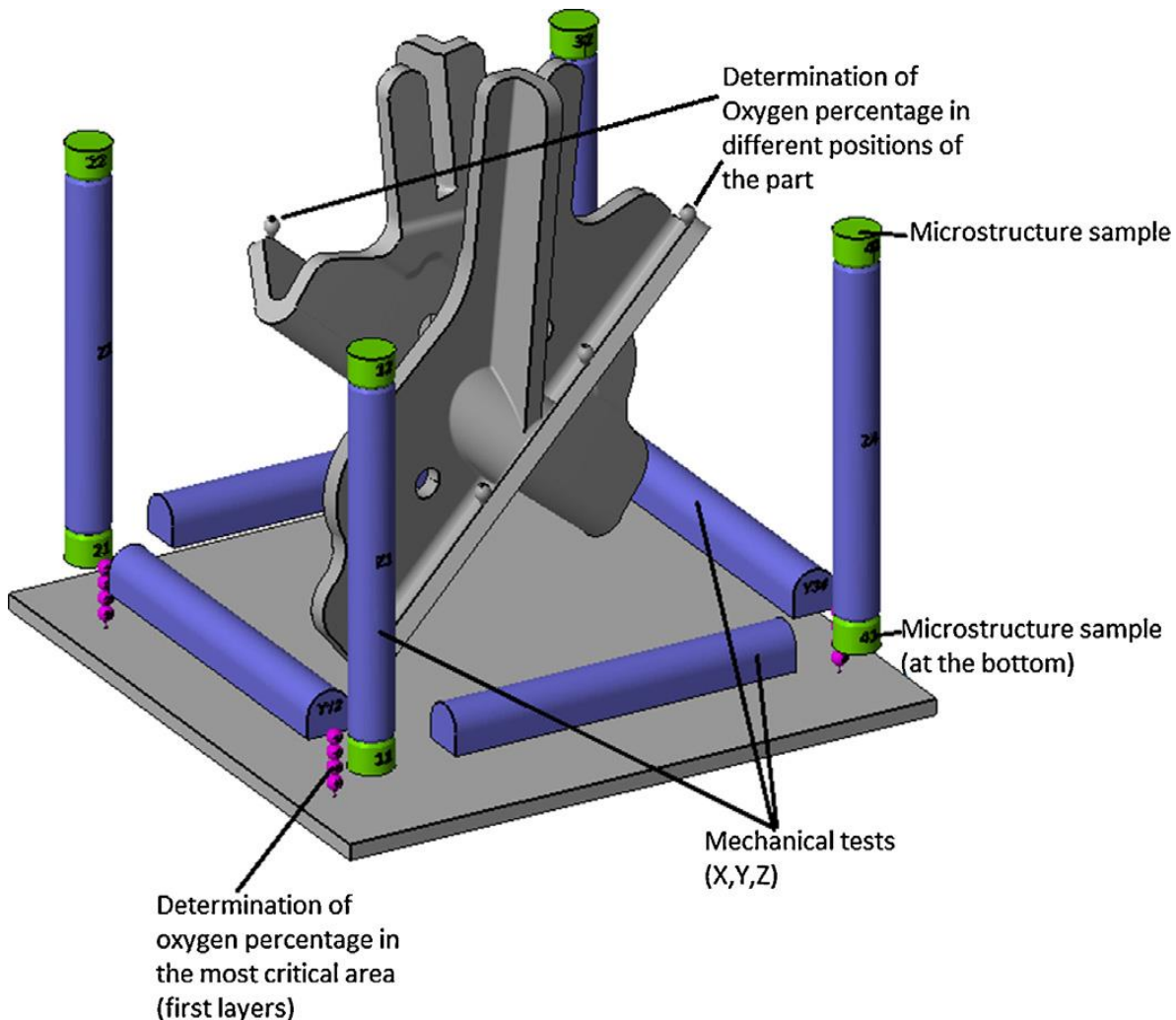


Figure 2.21 Représentation d'un lot de fabrication intégrant différents traceurs de qualité [Portolès & al. 2016]

Dans une utilisation semblable à celle de Portolès & al. les traceurs de qualité peuvent également servir à détecter la formation de pores plans dans la pièce.

2.3.3 Qualification des paramétries

Pour de nombreux acteurs de la fabrication additive, lorsqu'une machine peut fabriquer une pièce présentant tous les éléments critiques qu'une pièce peut avoir (comme les surfaces surplombantes avec l'EBM), la machine est alors capable de fabriquer tout type de pièce. Il s'agit d'une pièce test qui est fabriquée puis contrôlée. Ce contrôle permet de valider une paramétrie ou d'améliorer les paramétries des machines par des approches expérimentales. Dans la littérature, un nombre important de pièces de test sont proposées.

La pièce la plus connue à ce jour est celle proposée par le NIST représentée sur la Figure 2.22. Elle a été conçue dans l'objectif de qualifier plusieurs procédés de fabrication additive (EBM, SLM, mais aussi FDM, ...) avec une unique pièce [Moylan & al. 2014]. Sans rentrer dans les détails, il est possible de montrer que cette pièce ne peut pas être représentative de toutes les conditions de fusion qu'une pièce peut rencontrer : ici

toutes les géométries sont reliées à une pièce très massive. De même, il n'y a aucun élément qui se rapproche des structures lattices ou qui teste plusieurs inclinaisons de poutres cylindriques.

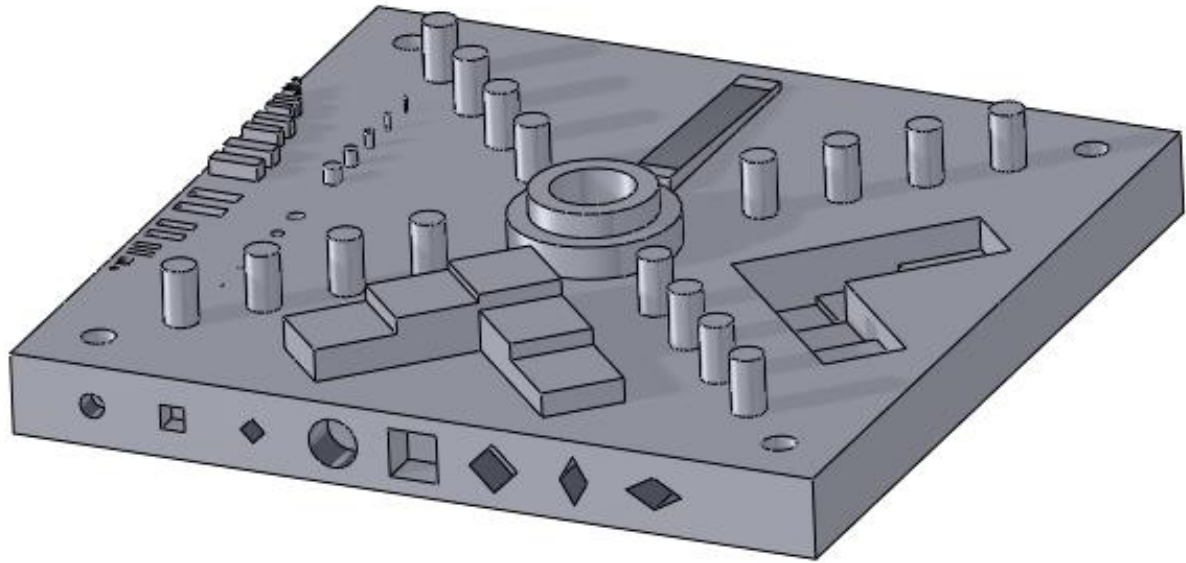


Figure 2.22 Géométrie de la pièce test proposée par le NIST [Moylan & al. 2014]

D'autres études s'intéressent plus spécifiquement à des paramètres définis et s'intéressent moins à la validation de paramétrie comme l'exemple de la Figure 2.22. Certaines études s'intéressent par exemple à la caractérisation de la répétabilité d'un défaut précis, permettant ainsi d'anticiper l'apparition de ce défaut et de trouver des solutions compensatrices [Cooke & Soons, 2010]. Il existe aussi des pièces de test permettant de déterminer les dimensions minimales que peuvent prendre certaines géométries [Miesel & Williams, 2015].

Chaque pièce proposée permet d'identifier un ou plusieurs critères de qualité pour le choix de paramétrie et la machine de fabrication mais aucune ne permet de faire un test complet et idéal. Des revues de la littérature ont été proposées pour mieux mettre en avant les propositions et avantages de chacune de ces propositions [Moylan & al. 2014 ; Rebaioli & Fassi, 2017 ; Yang & Anam, 2014].

2.3.4 Contrôler les pièces fabriquées par EBM

Dans beaucoup de cas industriels, la caractérisation de la qualité des pièces passe par leur étude approfondie après fabrication. Pour étudier une pièce fabriquée, il existe deux types de contrôle : destructif et non-destructif. Le contrôle destructif suppose d'avoir un procédé répétable contrairement au contrôle non-destructif. Pour ces deux types de contrôle, d'anciens et de nouveaux procédés de contrôle ont été adaptés ou développés afin de satisfaire les nouveaux besoins de la fabrication additive. Cette partie propose une revue de quelques dispositifs proposés pour la caractérisation des pièces en Ti-6Al-4V fabriquées par EBM.

2.3.4.1 Les contrôles destructifs

La première catégorie de contrôle est le contrôle destructif. Cela consiste principalement à mettre la pièce à évaluer en condition d'utilisation et tester ses limites ou catégoriser le matériau dont elle est faite en effectuant des essais mécaniques sur des éprouvettes témoins.

Dans le cas où la pièce est évaluée, les essais peuvent se faire, selon la pièce, par des essais classiques (traction, compression, flexion, etc.) ou sur un banc d'essai. Cette pratique implique la destruction de la pièce. Il faut donc que cette pièce soit fabriquée en plusieurs exemplaires. Dans l'industrie, plusieurs possibilités sont appliquées : une pièce est fabriquée en plusieurs exemplaires à différents endroits de l'espace de fabrication

dans un même lot et plusieurs de ces exemplaires sont testés afin de qualifier les autres. Dans ce cas, les pièces doivent être fabriquées, orientées et supportées à l'identique. Similairement, certains industriels réalisent la qualification d'un lot de fabrication entier en vue de le répéter plusieurs fois dans les mêmes conditions.

Ces deux possibilités de caractérisation ne sont valables que si le procédé donne une bonne répétabilité de fabrication d'une pièce à l'autre et d'une production à l'autre. Or, rien ne prouve que le procédé soit répétable : le nombre de paramètres humains est déjà important dans la préparation de la machine (exemples : le positionnement de la plaque de départ, la calibration du faisceau d'électrons ou des positions du râteau, ...) mais il existe plusieurs phénomènes aléatoires qui impactent la qualité de fabrication. Les interruptions du faisceau d'électrons illustrent bien le phénomène aléatoire.

Ces solutions ont été souvent utilisées auparavant et sont encore en pratique aujourd'hui. Mais les industriels s'intéressent désormais davantage aux moyens de contrôle non destructif.

2.3.4.2 Les contrôles non destructifs

Cette seconde catégorie recoupe toutes les méthodes de caractérisation des pièces sans dégradation. Il existe un nombre important de méthodes, nous allons donc limiter l'étude à celles qui sont utilisées ou s'appliquent le mieux aux pièces faites par EBM.

~ *Les défauts externes*

Parmi les solutions existantes, la plus simple à mettre en place et probablement la moins coûteuse aussi est le contrôle visuel. Ce type de contrôle permet rapidement de détecter des défauts géométriques classiques (délamination, défaut de forme, etc.) et de faire un premier tri sur la qualité des pièces fabriquées. Ce contrôle ne permet pas d'investiguer plus loin la qualité des pièces ni de réaliser une caractérisation des défauts observés. Il s'applique donc bien à la détection de défauts critiques.

Pour ce qui est de la validation des qualités géométriques ou dimensionnelles, il est possible d'utiliser les outils classiques de métrologie. Dans un premier temps, cela permettra de qualifier la forme et les dimensions des pièces et de leurs surfaces fonctionnelles. Pour les formes plus complexes (issues d'optimisation topologique par exemple), la pièce peut être scannée afin d'être comparée avec la CAO et de montrer les écarts géométriques et dimensionnels.

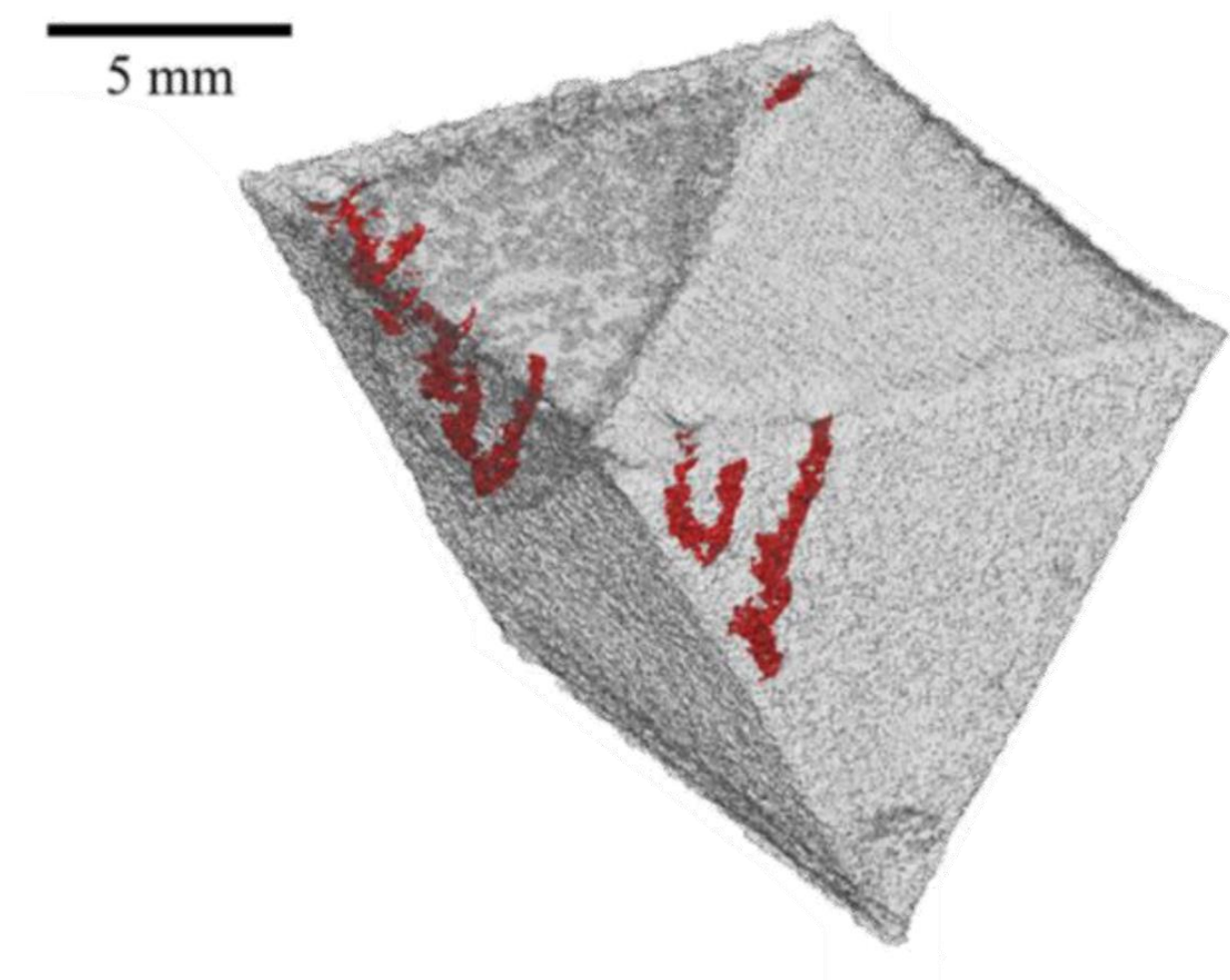
~ *Les défauts internes*

Pour la détection des défauts internes, tels que les pores et la délamination fermée, il existe plusieurs solutions. Avec les pièces fabriquées traditionnellement, des outils ont déjà été développés par le passé. La magnétoscopie, le contrôle par ultrasons en sont des exemples fréquemment utilisés dans l'industrie. Ils présentent cependant des limites avec les pièces fabriquées par EBM. Comme facteur limitant, il y a la rugosité des pièces, la complexité des géométries à contrôler et surtout la présence des pores sphériques qui apparaît comme un défaut et qui complique la détection de la délamination et des pores plans.

Dans la littérature, d'autres méthodes sont utilisées pour détecter les défauts internes. La méthode Archimède permet d'évaluer la densité de la pièce fabriquée, en comparant avec la densité du matériau, la porosité du matériau est estimée. Son principe simple consiste à mesurer la masse et le volume de la pièce pour obtenir une valeur de porosité. En général, il s'agit de mesurer à l'aide d'une balance de précision la masse de la pièce et la masse d'eau déplacée par son immersion (en vue de calculer son volume). Cette méthode présente un avantage économique certain mais révèle quelques limites. La Figure 2.23 est un exemple de limite : les pores observables en rouge sur la figure sont communicants avec l'extérieur. Cependant, ils pénètrent dans la matière de manière conséquente, parfois sur toute la hauteur. La méthode d'Archimède ne permet pas de détecter ce type de défaut car les pores sont ouverts et ne comptent plus dans le volume fermé de la pièce. En outre, la petite taille des ouvertures ne laisse pas présager la profondeur des

défauts et une inspection visuelle ne rendrait pas la pièce défectueuse. Avec une telle pièce, la méthode d'Archimède évaluerait cette pièce comme valide [Slotwinski & al, 2014 ; Wits & al. 2016].

La tomographie se trouve être la plus utilisée, la plus précise, efficace et pertinente des méthodes de détection de défauts internes. La tomographie permet aussi de caractériser les défauts internes et de faire la distinction entre un pore sphérique, plan ou la délamination. Il existe de nombreuses techniques de tomographie qui se différencient par la source d'énergie (neutrons, positons et autres), par la manière de détecter les particules/ondes émises ou par la catégorie des particules/ondes captées (transmises, diffractées, etc.). Dans notre cas, c'est la tomodensitométrie à l'échelle microscopique qui nous intéresse. Littéralement, il s'agit de microtomodensitométrie à rayons X. Nous ferons référence à cette technique par le raccourci *tomographie* dans la suite du document.



*Figure 2.23 Tomographie reconstituée d'une pièce poreuse
(volume poreux représenté en rouge) [Tammam-Williams & al. 2016b]*

La tomographie est utilisée à plusieurs reprises dans les études de ce manuscrit, son fonctionnement est détaillé dans les points suivants. La tomographie fonctionne selon le principe schématisé sur la Figure 2.24. La pièce analysée est irradiée avec une source de rayons X. Le faisceau est projeté sur un scintillateur qui transforme les rayons X en photons. Puis les photons sont captés par une caméra qui reconstitue une image numérique. Les rayons X sont atténués lorsqu'ils traversent de la matière dense. Ainsi, le scintillateur reçoit une plus ou moins grande intensité de rayons X transmis et cela se traduit par une émission proportionnelle de photons. Finalement, la radiographie montre une projection de la densité de la pièce analysée. Ensuite, en utilisant toutes les radiographies prises sous différents angles de la pièce, le volume tridimensionnel de la pièce est reconstitué.

Le résultat obtenu est une succession d'images correspondant à des coupes numériques de la pièce analysée. Avec des logiciels de traitement d'images, les images peuvent permettre de représenter le volume en trois dimensions en faisant apparaître les défauts (comme sur la Figure 2.23). Il est donc possible de détecter, mesurer et caractériser les défauts internes des pièces fabriquées par EBM grâce à cette technologie.

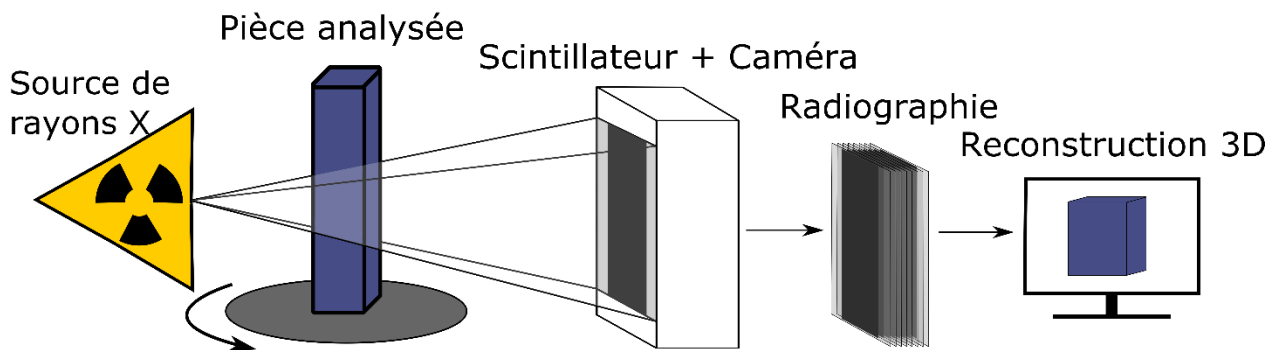


Figure 2.24 Schématisation du principe de la tomographie

Malgré ces atouts, la tomographie a aussi quelques limites, notamment en ce qui concerne la taille limite de la pièce analysée (par exemple, au-delà plusieurs millimètres de Ti-6Al-4V, les rayons émis par une source à faible énergie sont trop absorbés pour être détectables), la contrainte qu'il y a entre dimensions de la pièce et précision de la mesure et d'autres détails qui sont des cas particuliers. Il s'agit également d'un procédé onéreux qui a un impact sur le prix final d'une pièce [Thompson & al. 2016a].

Ici la tomographie sert à détecter les défauts internes d'une pièce, mais une tomographie peut également permettre une analyse des défauts externes d'une pièce. Elle peut notamment être utilisée pour mesurer la rugosité d'une pièce ou pour faire de la métrologie dimensionnelle comme le montrent Kruth & al. dans leurs travaux [Kruth & al. 2011]. Un même outil peut ainsi qualifier une pièce sur plusieurs critères.

Ces différents outils et méthodes de contrôle permettent la détection de la non-qualité et le cas échéant la validation des qualités des pièces testées. En détectant la non-qualité au plus tôt dans le processus, les pertes financières et temporelles sont réduites. Mais cela permet surtout de mieux identifier les causes de ces défauts. Lorsque les causes sont identifiées, des stratégies, facteurs correctifs et diverses règles peuvent être mis en place pour limiter les défauts voire les supprimer. Cet aspect constitue une partie importante de la maîtrise de la qualité.

2.4 Stratégies pour améliorer la qualité des pièces fabriquées.

Lorsque le procédé de fabrication et ses signatures sont maîtrisés, des stratégies peuvent être mises en place pour améliorer la qualité des pièces. Dans cette partie, nous nous intéressons aux observations des défauts et leurs caractérisations qui ont permis de mettre en place des solutions de correction. La littérature offre plusieurs études et propositions de solutions adaptées à la correction des défauts.

2.4.1 Conception

La phase de conception est la première étape du processus qui permet de définir des stratégies et des règles de conception permettant d'exploiter au mieux les capacités de la technologie EBM. Comme pour de nombreuses technologies traditionnelles de fabrication, la fabrication additive apporte ses propres règles de conception. Un exemple explicite de règle de conception est illustré par l'impossibilité de fabriquer des pièces fermées creuses avec les technologies de lit de poudre. La partie creuse serait en effet remplie de poudre et nécessiterait une ouverture pour permettre son évacuation. La règle qui se dégage est donc de ne pas fabriquer de pièce fermée comportant un trou non débouchant (sauf si le dépoudrage total de la pièce n'est pas souhaité). Ces règles sont illustrées dans de nombreux travaux publiés sous les appellations *Design for Additive Manufacturing* ou *Design Rules for Additive Manufacturing* [Carré, 2016 ; Leutenecker-Twelsiek & al. 2016 ; Mani & al. 2017 ; Morretton, 2018 ; Suard & al. 2014, 2015 ; Thompson & al. 2016b ; Vayre, 2014 ; Zhang & al. 2014].

Avec les nouvelles technologies de fabrication, nous voyons apparaître de nouvelles règles de conception mais également de nouveaux outils de conception. En effet, les technologies de fabrication additive permettent la réalisation de pièces d'un niveau de complexité élevé sans surcoût important. Des méthodes et outils d'aide à la conception voient alors le jour pour permettre aux concepteurs d'utiliser au mieux le potentiel de fabrication des machines. L'optimisation topologique est une approche très utilisée dans cet ensemble de méthodes et d'outils qui permet de répartir la matière dans un volume donné selon certaines contraintes et objectifs. Comme pour les règles de conception, la littérature regorge de méthodes et d'outils d'aide à la conception [Hsu & al. 2001 ; Langelaar, 2016 ; Larsen & al. 2009 ; Leary & al. 2014 ; Morretton, 2018 ; Mirzendehtdel & Suresh, 2016 ; Seepersad, 2014].

2.4.2 Préparation de production

Lors de la phase de préparation d'une production, de nombreux choix sont déterminants pour la qualité des pièces.

Dans la littérature il existe de nombreuses études portées sur les choix d'orientation de pièce permettant d'optimiser certains critères tels que le nombre de surfaces en porte-à-faux, les qualités dimensionnelles et géométriques ou bien le temps de fabrication, etc. [Das & al. 2015 ; Delfs & al. 2016 ; Moroni & al. 2015 ; Zhang & al. 2017 ; Zwier & Wits, 2016].

De même, les stratégies de supportage sont des sujets abordés dans la littérature. Certaines études proposent des méthodes de conception de supports pour faciliter leur retrait en post-production ou pour augmenter les échanges thermiques entre la pièce supportée et la poudre [Jin & al. 2015 ; Vaidya & Anand, 2016 ; Strano & al. 2013].

Le positionnement dans l'espace de fabrication est en revanche moins abordé dans la littérature. Des études de Hrabe & Quinn s'intéressent à l'impact de la distance entre une pièce et la plaque de départ sur la qualité des pièces [Hrabe & Quinn, 2013a, b]. Tiferet & al. s'intéressent à l'impact de la position dans le plan de fabrication d'un point de vue matériau et comportement mécanique [Tiferet & al. 2018]. Nous nous sommes intéressés à la même problématique avec le point de vue de la qualité géométrique des pièces.

2.4.3 La fabrication

Les stratégies de fusion ont un impact majeur sur de nombreux critères de qualité des pièces. En appliquant certains jeux de paramètres, il est possible d'améliorer la qualité d'un lot de fabrication sur certains critères.

2.4.3.1 Des stratégies de fusion adaptées

~ *Des paramètres de hatching pour améliorer la composition chimique*

En ajustant certains paramètres des différentes stratégies lors de la fabrication, il est possible d'agir sur un critère de qualité ciblé sans qu'il y ait de conséquences pour d'autres facteurs de qualité. Ainsi, Scharowsky & al. montrent que l'augmentation de la vitesse de balayage et la réduction de l'espacement entre deux lignes de fusion permettent de réduire la vaporisation de l'aluminium lors du *hatching* sans augmenter le temps de fusion ou être dommageable aux propriétés mécaniques de la pièce [Scharowsky & al. 2017]. Si la vaporisation de l'aluminium peut être dommageable pour les propriétés du matériau, elle l'est également pour l'entretien de la machine. L'aluminium vaporisé se dépose sur les parois de la machine à plusieurs endroits créant parfois des dépôts susceptibles de se réintroduire dans la poudre.

~ *Une stratégie pour augmenter la conductivité de la poudre lors du preheat*

Concernant le *preheat*, plusieurs travaux montrent qu'une augmentation de la densification de la poudre est bénéfique à la qualité des surfaces fabriquées [Smith & al. 2017 ; Drescher & al. 2016]. Smith montre qu'il est possible d'augmenter la conductivité thermique de la poudre en fixant le paramètre d'énergie apportée (ce paramètre est normalement calculé par EBM Control) [Smith & al. 2017]. Pour Drescher & al., c'est la réduction de la vitesse de balayage du faisceau lors du *preheat* qui permet d'augmenter la conductivité de la poudre [Drescher & al. 2016]. L'augmentation de cette conductivité thermique a pour effet de mieux diffuser la chaleur apportée à la pièce lors de la phase de fusion et donc de réduire les risques de malformation de la pièce. Il y a cependant un risque que la poudre soit davantage consolidée et donc que le dépoufrage du lot se fasse moins bien, mais cela n'a pas été abordé dans cette étude.

En revanche, cette augmentation peut aussi avoir pour effet de faire, par endroits, fondre la poudre au lieu de la consolider. Les pièces sont alors difficiles à dépoufrer avec le *PRS* et la poudre qui a été fondue n'est pas recyclée. Les poudres qui n'ont pas été fondues sont connectées entre elles par des cous de taille plus importante, si elles restent recyclables, cela a cependant des conséquences sur la rhéologie des poudres dans la machine [Smith & al. 2017]. De plus, les poudres recyclées ont des taux plus importants d'oxygène après le *preheat* [Drescher & al. 2016]. Cela n'impacte cependant pas la microstructure finale des pièces [Drescher & al. 2016].

~ *Une stratégie de fusion adaptée aux structures lattices*

Dans ses travaux, Béraud [Béraud & al. 2017] propose une approche différente de celle proposée par Suard [Suard & al. 2015] pour améliorer la fabrication des poutres des structures lattices. L'approche de Suard consiste à adapter la conception du treillis pour que le résultat corresponde aux attentes de l'utilisateur, celle de Béraud consiste à adapter la paramétrie.

Ainsi, en modifiant la trajectoire du faisceau, le courant de focalisation, le courant du faisceau pour chaque trajectoire, la vitesse de balayage, il est possible d'obtenir une meilleure précision en fabrication. A l'aide d'une simulation du procédé sur plusieurs couches, Béraud & al. identifient des paramètres permettant d'augmenter la précision du faisceau d'électron pour la fabrication de structures treillis [Béraud & al. 2017].

2.4.3.2 Des stratégies de fusion pilotées

Le pilotage du faisceau d'électrons pendant la fabrication n'est pas une chose simple. Dans le cas standard d'utilisation d'une machine EBM, l'utilisateur n'intervient pas sur les stratégies et paramètres du faisceau d'électrons. Il existe plusieurs solutions pour rendre le faisceau d'électrons apte à être piloté pendant la fabrication.

~ Une paramétrie pour orienter la microstructure

Si les paramètres standards de l'EBM pour le Ti-6Al-4V permettent d'obtenir un matériau isotrope, il est également possible de modifier la paramétrie de la machine pour influencer une croissance de grain et orienter la microstructure.

Les travaux qui s'intéressent à ces propriétés montrent qu'il est possible d'obtenir un matériau monocristallin [Chauvet & al. 2018], mais aussi qu'il est possible d'obtenir un matériau composite contenant plusieurs variantes du matériau : polycristallin équiaxe et colonnaire et monocristallin [Dehoff & al. 2015]. Faire varier la microstructure et l'orientation des grains a un impact direct sur les propriétés mécaniques de la pièce. Ainsi différentes stratégies de fabrication peuvent être choisies selon les propriétés souhaitées pour la pièce. Dans le cas d'une turbine, il peut être intéressant de fabriquer un rotor avec des aubes monocristallines et un arbre polycristallin, le tout en une seule pièce. De même, il peut être intéressant de faire varier la cristallographie des poutres dans les structures lattices pour mieux correspondre à leur sollicitation principale.

Finalement, faire varier la microstructure du matériau qui constitue une pièce revient à faire une pièce « composite » avec un seul matériau. Cet effet est déjà couramment appliqué pour les structures lattices et l'optimisation paramétrique : le diamètre des poutres d'une structure est un paramètre qui influe sur les propriétés du nouveau matériau [Doutre, 2018]. En combinant les structures lattices de densités différentes (par exemple en changeant la taille de maille unitaire ou le diamètre des poutres), créer des pièces ayant des propriétés semblables à des pièces composites devient possible. Faire varier la microstructure et la cristallographie du matériau permet de donner une dimension supplémentaire de variabilité. La densité des structures lattices, la microstructure et l'orientation des cristaux sont des paramètres qui permettent de conférer à la pièce un comportement spécifique local [Dehoff & al. 2015].

~ Un pilotage intelligent pour éliminer la porosité

L'équipement présenté dans la partie 2.3.1.2, sous le nom ATHENE, permet un pilotage intelligent du faisceau d'électrons. Grâce à l'instrumentation intégrée à la colonne, la formation des pores en surface est détectée et corrigée pendant le process [Osmanlic & al. 2018]. Après chaque melt, un scan est effectué sur la couche en cours afin de déterminer la qualité de la fusion. Lorsque des pores sont détectés, le faisceau d'électrons est réactivé pour corriger le manque de fusion comme illustré sur la Figure 2.25. La couche se termine lorsque le scan ne relève aucun pore sur la couche.

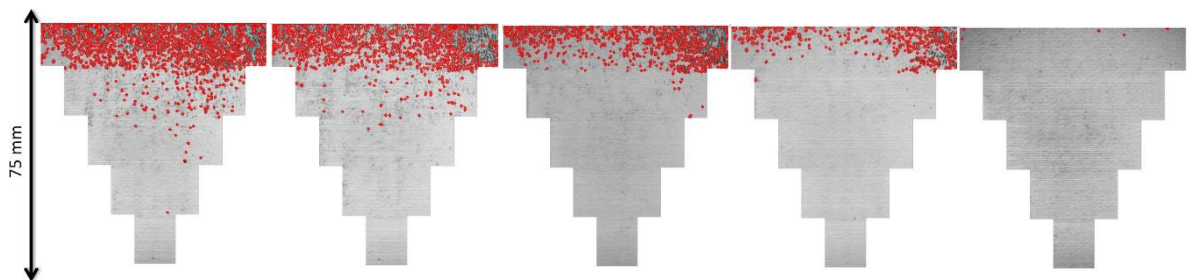


Figure 2.25 Scans d'une couche réalisés à plusieurs itérations de correction de la fusion par le canon ATHENE (pores détectés en rouge) [Osmanlic & al. 2018]

Ce système n'est cependant pas encore développé pour être commercialisé, il s'agit d'un prototype adapté à une Arcam S12 et développé par le département de science des matériaux de l'Université Friedrich-Alexander Erlangen-Nürnberg en partenariat avec la société pro-beam. Le principe qu'il porte est prometteur et semble très adapté à l'élimination des pores formés pendant la fabrication. Mais il ne constitue pas encore une solution applicable dans l'industrie.

2.4.4 Le post-traitement

2.4.4.1 La réduction de la porosité

La Compression Isostatique à Chaud (CIC) est un procédé très utilisé en fabrication additive. Ce procédé permet en effet de refermer les pores des pièces poreuses. Ce procédé fonctionne sur les pores plans et sphériques à la condition qu'ils ne soient pas débouchants. La Figure 2.26 illustre les effets de la CIC sur deux pièces différentes. Lorsqu'un pore est débouchant (Figure 2.26 b), identifié par la flèche rouge), la CIC n'a pas d'effet et ne permet donc pas de le refermer.

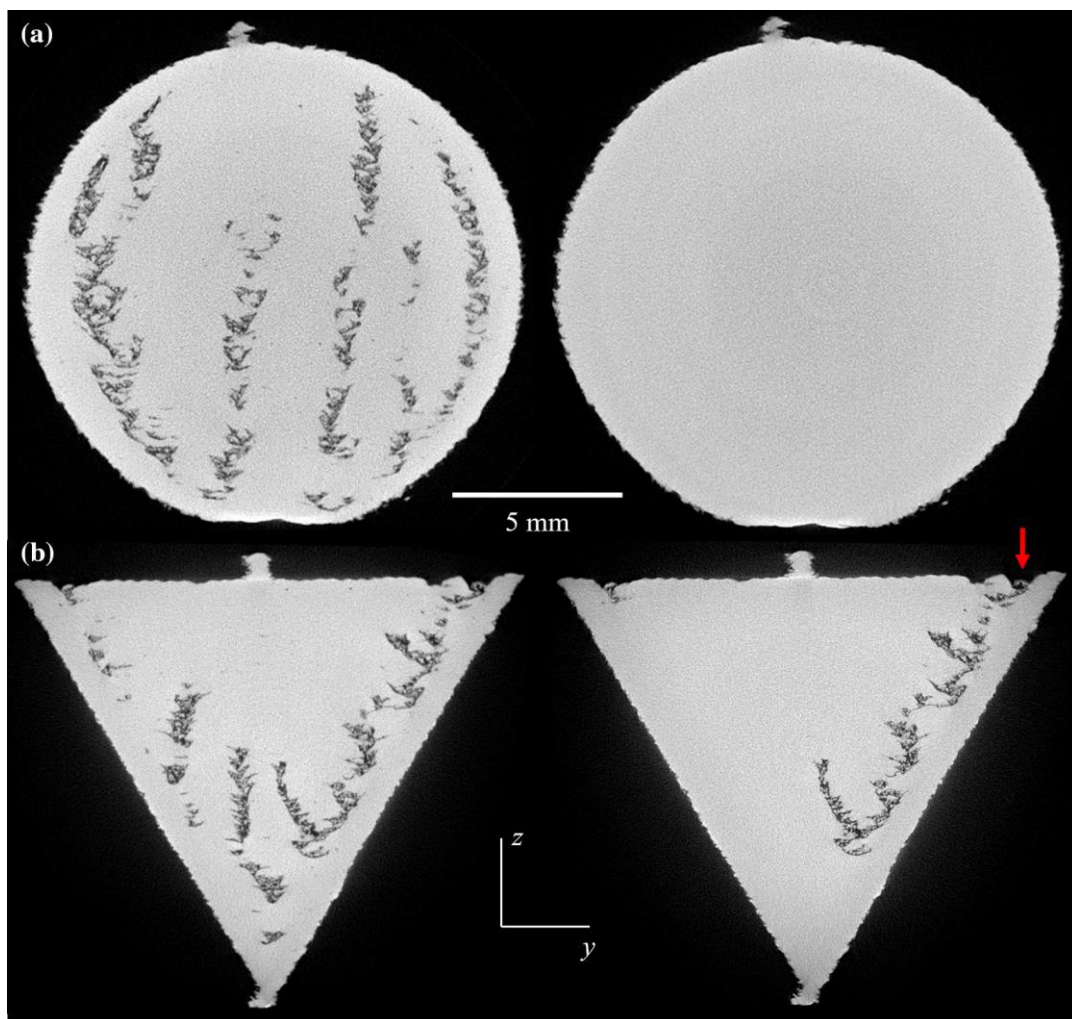


Figure 2.26 Coupes tomographiques comparatives de pièces poreuses après fabrication (gauche) et après CIC (droite) [Tammam-Williams & al. 2016b]

Lorsque les pièces sont poreuses, la CIC permet d'améliorer les propriétés mécaniques des pièces sans trop affecter leurs compositions chimiques [Hrabe & al. 2017 ; Svensson & al. 2009 ; Tammam-Williams & al. 2016b ; Zhao & al. 2016]. Cependant, les pores ne sont pas vides, ils referment du gaz (argon pour les pores sphériques, pseudo-vide composé principalement d'hélium pour les plans). Si la CIC permet de refermer les pores, elle ne permet en revanche pas de les faire disparaître. La Figure 2.27 montre qu'une CIC peut laisser

penser que le pore a disparu. En réalité, il n'est plus observable avec la précision des outils utilisés. Ainsi, un traitement thermique peut faire réapparaître ces pores prétendument disparus [Tammam-Williams & al. 2016a]. De même, la matière présente autour d'un pore a une microstructure beaucoup plus fine, et cela indépendamment de la taille du pore.

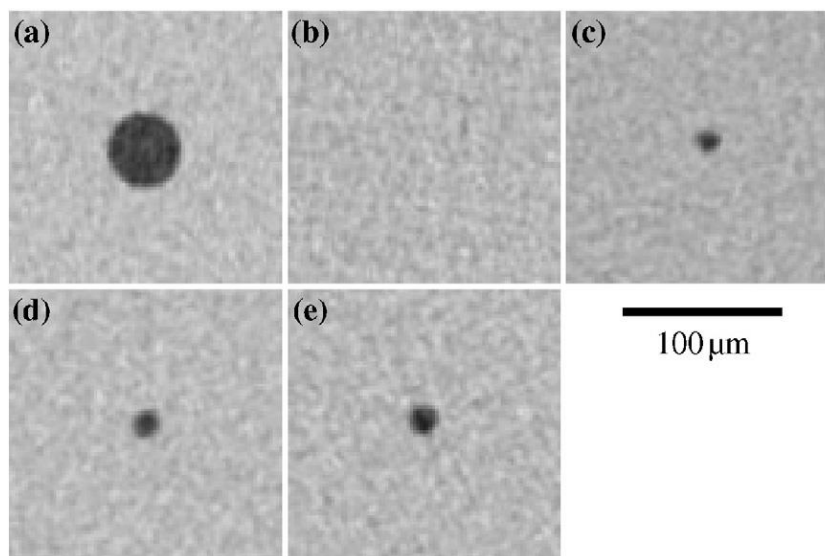


Figure 2.27 Coupe virtuelle de pièce tomographiée sortie de machine (a), après CIC (b), après TT de 10 minutes à 1035°C (c), après TT de 10h à 1035°C (d) et après TT de 10 minutes à 1200°C (e) [Tammam-Williams & al. 2016a]

2.4.4.2 La réduction de la rugosité

La rugosité des pièces fabriquées par EBM est un problème récurrent, elle a un impact modéré sur les pièces denses mais représente un réel problème pour les structures lattices et, de manière générale, les éléments dont une des dimensions est de l'ordre du millimètre. Ainsi, la rugosité dans les structures lattices représente un poids supplémentaire sans augmentation de résistance mécanique. Un des intérêts majeurs des structures lattices étant de proposer un matériau alternatif entre le vide et le matériau dense ; ces structures sont principalement utilisées pour le gain de masse qu'elles offrent. La rugosité est alors directement nuisible à ce gain de masse.

La littérature montre que les techniques usuelles de finition mécanique et mécano-chimique ne permettent pas d'améliorer l'état de surface de manière homogène sur des structures lattices [Suard, 2015]. En effet, les poutres situées à l'extérieur sont mieux et plus traitées que les poudres à l'intérieur du maillage. La littérature actuelle semble montrer que les attaques chimiques sont plus adaptées pour l'amélioration des états de surface des pièces en tout genre dont les structures lattices. Combinées à une CIC, les attaques chimiques permettent même d'obtenir des propriétés comparables à celle de pièces usinées (en traction simple et en fatigue) [Suard, 2015].

Pour réduire la rugosité des poutres externes et internes des structures lattices, il vaut donc mieux éviter les procédés de finition mécanique. Pour le traitement de surfaces géométriques complexes, il existe plusieurs autres possibilités. L'électro-polissage est un moyen qui offre des résultats intéressants avec le Ti-6Al-4V, cependant le procédé affecte préférentiellement les poutres externes et les résultats obtenus sont similaires à une finition mécanique ou mécano-chimique [de Formanoir & al. 2016 ; Lhuissier & al. 2016 ; Persenot & al. 2018 ; Suard, 2015].

2.4.4.3 Les propriétés mécaniques

Le matériau issu de l'EBM a des propriétés mécaniques satisfaisantes en dehors des structures lattices et de leur comportement en fatigue. Ces derniers cas font l'objet des deux points précédents. Il n'est donc a priori pas nécessaire d'effectuer d'opération de post-traitement pour améliorer les propriétés mécaniques d'une pièce. Cependant, les autres opérations qui s'effectuent après fabrication peuvent détériorer ces propriétés.

Tammas-Williams & al. montrent qu'une CIC peut induire des contraintes résiduelles dans le matériau : le pore contenant une bulle de gaz se retrouve comprimé pendant la CIC, il introduit des contraintes dans le matériau après cette compression. Cette contrainte a aussi un impact sur la recristallisation du matériau à proximité du pore rendant le tout hétérogène. Un traitement thermique permet de relâcher ces contraintes et limite l'impact de la CIC sur les propriétés du matériau [Tammas-Williams & al. 2016a].

Les opérations de finitions peuvent également introduire des contraintes résiduelles en surface. Ce phénomène est déjà connu pour l'usinage conventionnel, il est également retrouvé lorsque les supports sont arrachés à la pièce. Un traitement thermique permet d'éliminer ces contraintes.

2.5 Conclusion

2.5.1 Bilan

Dans ce chapitre, nous avons vu le processus complet de production d'une pièce avec la technologie EBM. Il s'agit d'un processus complexe qui demande une bonne maîtrise dans plusieurs domaines de compétence. Le deuxième point abordé fait l'inventaire des défauts et montre que la qualité des pièces peut être influencée tout au long de ce processus. Ces défauts sont variés et portent sur les qualités physiques, géométriques et dimensionnelles des pièces. Pour détecter, caractériser et anticiper ces défauts, plusieurs méthodes, outils et recommandations ont été identifiés tout au long du procédé et sont présentés dans le troisième point. Enfin, le quatrième point fait un rapide inventaire des différentes stratégies identifiées dans la littérature qui permettent d'améliorer la qualité des pièces.

Dans cette revue de la littérature, il apparaît que la maîtrise de la qualité pour la technologie EBM est enrichie par des domaines très variés. De la conception à la finition, en passant par la métallurgie et la simulation, beaucoup de domaines éloignés apportent des briques à cet édifice. Contrairement à de nombreux procédés traditionnels, la fabrication additive est contrainte à fabriquer le matériau et la géométrie des pièces simultanément. Cela explique, d'une part, le nombre de domaines de compétences qui s'intéressent au procédé EBM et, d'autre part, la complexité d'une modélisation idéale du procédé.

Si cette technologie reste encore complexe à modéliser et à parfaitement maîtriser, c'est aussi parce qu'elle est encore très récente. En effet, la littérature s'enrichit davantage chaque année et cela ne semble pas s'infléchir avec le temps.

2.5.2 Perspectives et travaux

Ce qui ressort de cette analyse de la littérature est que l'état de l'art n'adresse pas l'intégralité du champ des possibles en matière de maîtrise de la qualité pour la fabrication additive par EBM. Certaines questions subsistent encore et, parmi elles, deux ont été identifiées et sélectionnées pour être étudiées. Les travaux de cette thèse sont donc axés sur deux thématiques principales.

La première thématique porte sur l'étude de l'espace de fabrication avec la problématique de l'homogénéité. La question posée concerne les impacts du placement d'une pièce à des positions différentes de l'espace de fabrication. Ce point est présenté dans le Chapitre 3, il fera la synthèse des méthodes utilisées, de l'expérimentation menée et des résultats, discussions et solutions qui en découlent.

La seconde thématique concerne la détection de pores plans et délamination dans les pièces denses. Nous nous intéressons alors aux moyens de contrôle de la présence de pores plans (ceux générés par manque de fusion). Le principe proposé utilise un élément traceur qui est inséré dans l'espace de fabrication et analysé après fabrication. Deux approches différentes de contrôle ont été expérimentées dans le Chapitre 4. Enfin, le Chapitre 5 s'intéresse au traitement automatique des données issues de la tomographie d'un témoin en vue d'évaluer la porosité du matériau.

Chapitre 3. Etude de l'homogénéité de l'espace de fabrication

3.1 Introduction et problématique

Cette étude sur l'espace de fabrication s'intéresse au volume disponible pour la fabrication de pièces dans une machine. Dans le cas de la machine Arcam A1, il s'agit d'un volume parallélépipédique de dimensions 200 mm suivant les axes du lit de poudre et 190 mm en hauteur. Ce volume représente l'espace disponible pour la fabrication d'une pièce ou d'un lot de pièces. Il est généralement représenté avec la pièce ou lot de pièces à produire ; ces pièces sont orientées et positionnées dans cet espace et elles intègrent les supports qui leurs sont attribués.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons uniquement au positionnement des pièces dans l'espace et plus précisément à l'impact que peut avoir une position donnée sur la qualité géométrique. La question posée est : « Deux pièces conçues à l'identique et fabriquées à des endroits différents de l'espace de fabrication sont-elles identiques une fois fabriquées ? ».

Cette question vient d'une constatation de différence géométrique entre des pièces qui auraient dû être similaires. Cette différence s'est illustrée à plusieurs occurrences sans qu'elle ait été caractérisée, elle était jusqu'alors interprétée comme une différence générée aléatoirement par le procédé. En analysant, les pièces et en confrontant les pièces malformées avec leur position dans l'espace de fabrication nous constatons qu'un lien entre la position et la malformation est possible. Les pièces présentant des défauts sont généralement proches des limites de l'espace de fabrication.

3.1.1 Les études existantes

Dans la littérature quelques études s'intéressent à l'impact de la position sur la qualité d'une pièce pour différentes technologies de fabrication additive. Les technologies qui sont les plus adressées dans la littérature sont les technologies de dépôt de fil plastique. Concernant la technologie EBM, peu d'études abordent cette thématique.

Tiferet & al. s'intéressent principalement à la qualité des pièces sur des critères de propriétés mécaniques et physiques [Tiferet & al. 2018]. Leur étude consiste à fabriquer une grande quantité d'éprouvettes identiques sur tout l'espace de fabrication, comme illustré sur la Figure 3.1 , pour comparer les éprouvettes en fonction de leur position dans l'espace de fabrication. Ces éprouvettes sont destinées à subir des tests différents dans le but de qualifier la densité, la limite élastique, l'élongation, la rupture en fatigue ou encore la microstructure du matériau.

Les tests réalisés sur ces 225 (15*15) éprouvettes montrent que les propriétés mécaniques sont plus faibles sur les éprouvettes en bordure de l'espace de fabrication. Ces éprouvettes ont une limite élastique et un allongement à la rupture plus faibles. Leur comportement en fatigue est également moins bon que pour les éprouvettes au centre de l'espace de fabrication. En revanche, les éprouvettes n'ont pas de différence de densité significative dans le plan de fabrication. Il n'y a pas non plus de différence importante concernant la microstructure et cela même dans la hauteur d'une éprouvette (le bas d'une éprouvette comparée au milieu et au haut) [Tiferet & al. 2018].

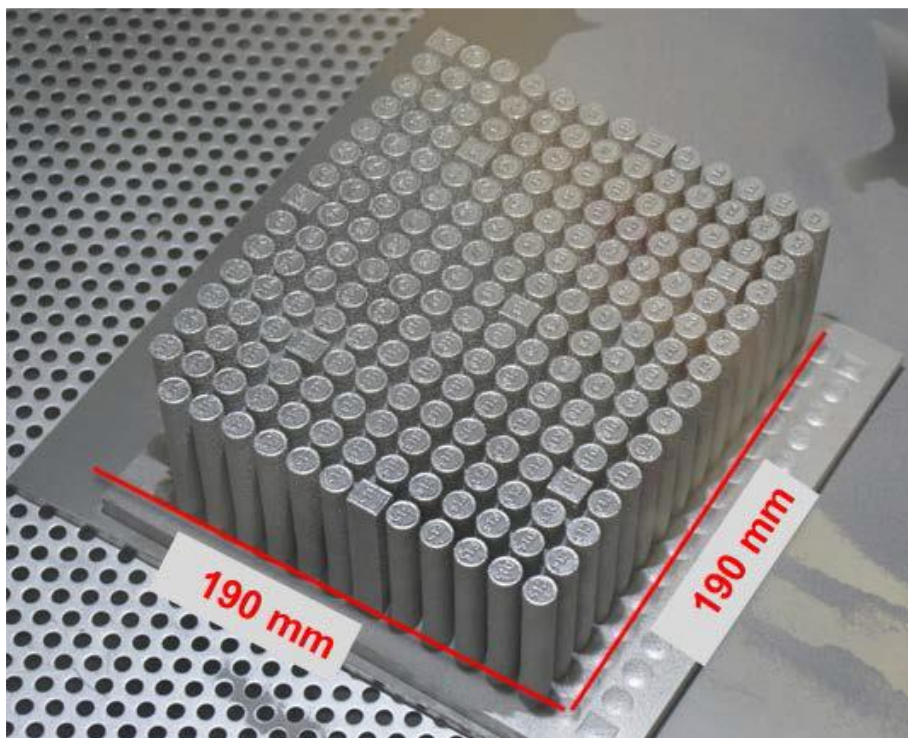


Figure 3.1 Lot d'éprouvettes fabriquées pour caractériser l'espace de fabrication [Tiferet & al. 2018]

Cette étude montre que les caractéristiques mécaniques sont meilleures pour les éprouvettes positionnées au centre de l'espace de fabrication. Ce résultat est la signature d'une hétérogénéité des conditions de fabrication dans l'espace de fabrication. Le choix de la position a donc bien un effet sur la qualité finale d'une pièce. Tiferet & al. démontrent cependant qu'une compression isostatique à chaud efface les différences de propriétés mécaniques entre les éprouvettes. Grâce à la compression isostatique à chaud après fabrication, les propriétés en traction simple et en fatigue sont semblables quelle que soit la position de la pièce évaluée [Tiferet & al. 2018]. D'autres résultats dans la littérature coïncident avec les résultats de cette étude [Hrabe & Quinn, 2013a, 2013b & 2017 ; Tammam-Williams & al. 2016a].

3.1.2 Les objectifs de l'étude

Il y a dans la littérature quelques études sur les propriétés mécaniques des pièces mais les aspects qualité géométrique sont peu abordés. Or, si la position a un impact sur la géométrie de la pièce, il faut pouvoir l'anticiper car il s'agit d'un défaut qui ne peut pas être corrigé simplement. Si une compression isostatique à chaud suffit à rétablir une homogénéité de comportement entre les différentes pièces, rien de comparable n'existe pour corriger la géométrie des pièces.

L'objectif de l'étude est donc de déterminer s'il existe une relation entre défaut géométrique et position dans l'espace de fabrication et, si cette relation existe, de caractériser l'impact de la position dans l'espace. Pour cela, les paramètres de position dans l'espace de fabrication (position dans le plan de fabrication et position en hauteur dans le lot de fabrication) doivent être méthodiquement étudiés. Dans un second temps, des solutions sont identifiées pour réduire, contourner ou pallier les défauts. Puis les phénomènes causant cette hétérogénéité de qualité dans l'espace de fabrication sont identifiés.

3.2 Méthodes expérimentales

3.2.1 Choix de conception des éprouvettes

Bien que l'étude présentée ici soit antérieure à la publication des travaux de Tiferet & al., la méthode utilisée est très semblable. Elle consiste à fabriquer une géométrie donnée de part et d'autre de l'espace de fabrication puis d'en étudier la géométrie.

Pour notre étude, deux types de géométries différentes sont retenues : les structures lattices et les pièces minces. Les pièces pleines et massives sont sujettes à des malformations géométriques récurrentes (voir 2.2.3.1 Les défauts de forme). Or, pour que ces défauts ne viennent pas perturber ceux que nous souhaitons observer, il est préférable d'opter pour des pièces avec de faibles épaisseurs. L'avantage d'utiliser ces deux types de géométries est, d'une part, d'identifier si les défauts sont du même ordre quel que soit le type de géométrie, puis d'autre part, d'observer l'impact de la position à travers deux points de vue différents : les défauts ne sont pas observables de la même manière sur la pièce mince et celle architecturée. Sur la pièce mince, il est possible d'évaluer les défauts de forme des surfaces tandis que la pièce en structures lattices permet d'observer des défauts géométriques plus complets en comparant les structures lattices fabriquées et celles conçues. Sur la Figure 3.2, l'apport de la structure lattices par rapport à la pièce mince est illustré par la déformation du maillage.

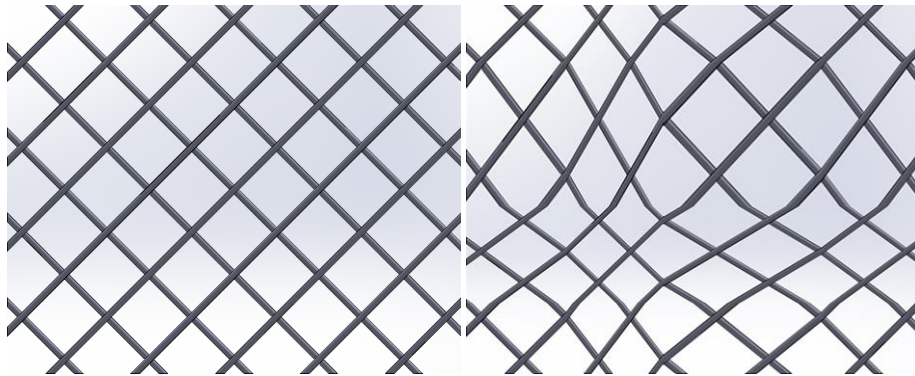


Figure 3.2 Illustration des possibilités d'observations de défauts rendus possibles avec les structures lattices

Ce type d'étude peut être perturbé par de nombreux épiphénomènes que nous devons maîtriser au mieux. Pour cela, certains paramètres sont fixés et des configurations particulières sont sélectionnées. Pour limiter les risques d'introduire des défauts et la variabilité entre les productions, la fabrication des deux géométries est réalisée avec des paramètres standards Arcam, sans stratégie de supportage (les supports sont susceptibles de gêner l'observation des défauts) pour toutes les productions.

L'objectif est d'observer une différence de qualité géométrique entre les pièces et également la variation locale de malformation sur chacune des pièces. Pour éviter de privilégier une direction particulière, des pièces ayant une forme de révolution sont retenues. Ainsi, une forme cylindrique est attribuée aux deux géométries. Le dimensionnement des cylindres est fait en se basant sur les défauts observés dans des productions antérieures. Les défauts observés sont généralement présents dans les 5 premiers mm fabriqués. Ce défaut est ensuite atténué sur les couches suivantes. Il faut jusqu'à 15 mm de hauteur pour que le retour à la normale (i.e. toutes les couches sont à nouveau planes) soit complet. Afin de s'assurer que le défaut et ses répercussions soient présents en intégralité sur la pièce, la géométrie est dimensionnée à 30 mm en hauteur. Ces différentes zones d'affectation sont représentées respectivement en rouge et orange sur la Figure 3.3.

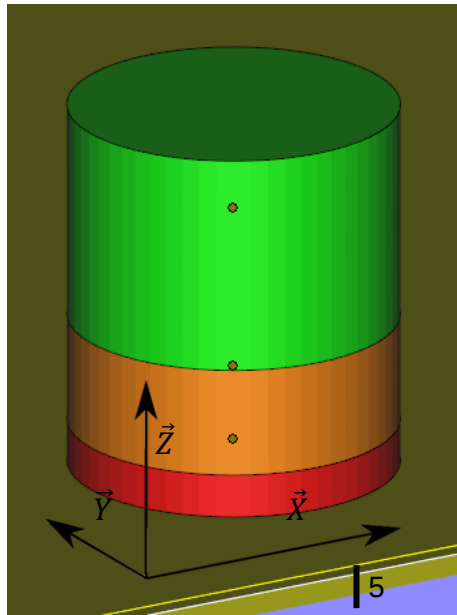


Figure 3.3 Représentation des zones affectées par le défaut

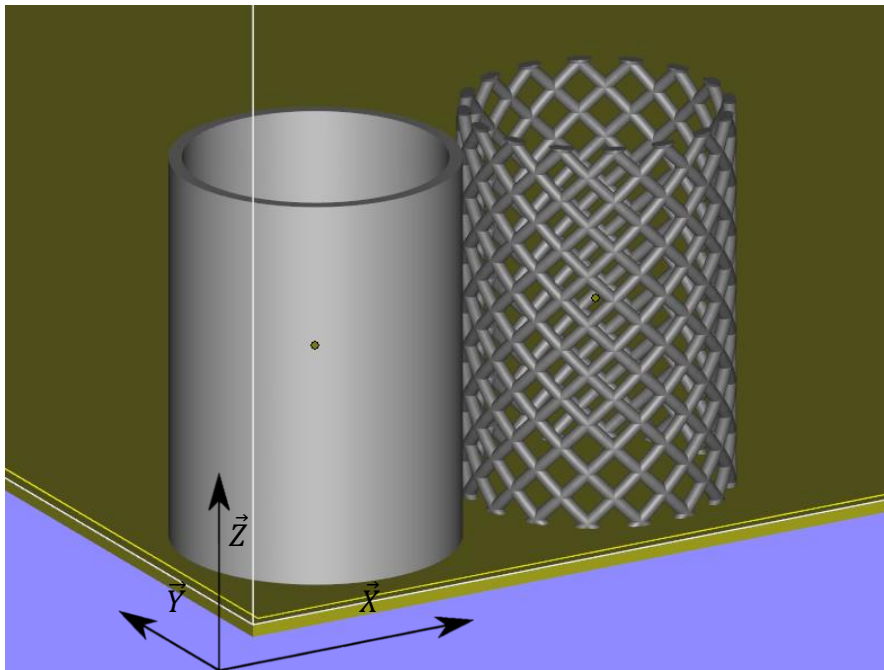


Figure 3.4 Géométries des éprouvettes mince (à gauche) et structurée (à droite)

Sur une surface surplombante plane et non supportée, la partie la plus affectée par ce défaut se situe à chaque fois sur la périphérie de la surface. La périphérie des cylindres est donc plus intéressante et pertinente pour l'étude. De plus, pour s'affranchir des défauts engendrés par la fabrication de volume massif, une géométrie tubulaire avec une paroi de 1 mm d'épaisseur pour la pièce mince est retenue. La pièce structurée est composée de poutres hélicoïdales de section circulaire ($\varnothing 1$ mm) orientées à $\pm 45^\circ$ de l'axe du cylindre. Ces deux géométries sont représentées sur la Figure 3.4.

3.2.2 Organisation du lot de fabrication

Dans la littérature, plusieurs études montrent que la proximité des pièces fabriquées simultanément peut avoir un impact sur leur qualité [Cheng & al. 2014, Riedlbauer & al. 2017, Zinovieva & al. 2018]. Ces impacts sont issus de la modification thermique de l'espace de fabrication générée par la fusion des pièces. Au-delà de 1 mm de distance les effets de cette modification ne sont presque plus perceptibles. Dans le but de se

préservé de ces effets, une distance supérieure à 1 mm est appliquée entre les pièces. Les éprouvettes sont réparties sur tout l'espace de fabrication et celles qui sont à proximité des limites de l'espace n'ont pas les mêmes conditions que celles au centre : le nombre de pièces avoisinantes n'est pas le même pour une pièce positionnée dans un coin ou au centre. Dans le but de s'assurer que c'est bien la position dans l'espace de fabrication et non la proximité d'autres pièces qui impacte la qualité des pièces, plusieurs géométries de diamètre différent sont fabriquées concentriquement. La configuration est illustrée sur la Figure 3.5. Ainsi, les deux plus petits tubes sont fabriqués dans des conditions de proximités identiques aux autres quelle que soit leur position dans l'espace de fabrication. Les diamètres des tubes sont de 30, 20 et 10 mm.

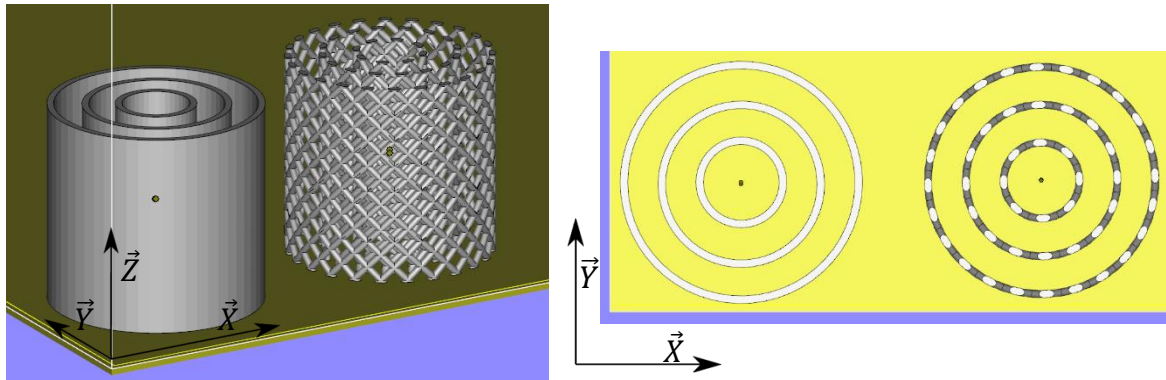


Figure 3.5 Représentation des éprouvettes imbriquées en perspective (à gauche) et vues du haut (à droite)

Regroupées par trois, ces pièces sont fabriquées simultanément sur tout l'espace de fabrication. Chaque groupe est répété cinq fois dans chacune des deux dimensions du plan du lit de poudre avec un écart de 10 mm (la contrainte de 1 mm est ainsi respectée). Cette configuration est illustrée sur la Figure 3.6. Les couches d'éprouvettes sont également séparées de 10 mm entre elles, cette distance sépare aussi la première couche d'éprouvette de la plaque de départ.

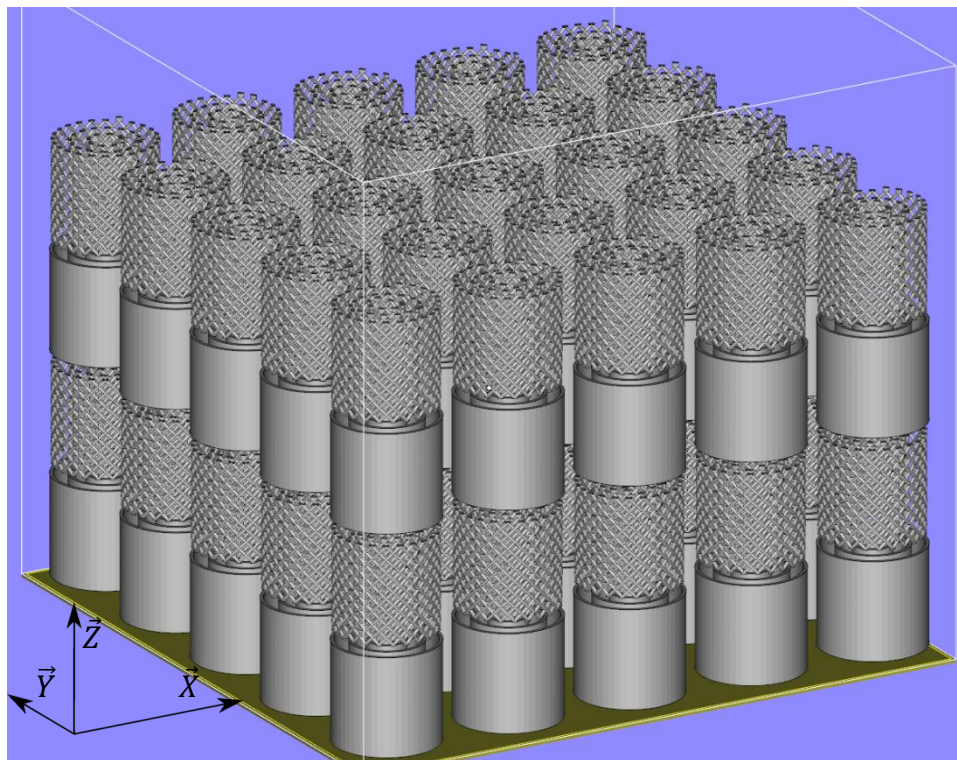


Figure 3.6 Exemple de lot de fabrication pour déterminer la répartition des défauts géométriques dans l'espace de fabrication

Une couche de pièces permet de caractériser l'impact de la position dans le plan de fabrication mais il faut également le caractériser dans la hauteur. La littérature et les observations laissent à penser que la hauteur n'a pas d'impact sur la qualité [Tiferet & al. 2018], mais cela doit être vérifié. Le lot présenté sur la Figure 3.6 permet de s'assurer que la position en hauteur dans l'espace de fabrication n'a pas d'impact sur la qualité géométrique des pièces. En comparant plusieurs couches de pièces fabriquées à différentes altitudes dans l'espace de fabrication, l'impact de la hauteur peut être caractérisé.

Afin de ne pas confondre les éprouvettes et donc de pouvoir les manipuler sans risque de les échanger, elles sont toutes identifiées par un code. Pour les pièces minces, il s'agit d'une identification numérique inscrite en haut de l'éprouvette. Pour les pièces structurées, il s'agit d'une identification binaire réalisée par une extrusion des fins de mailles de la surface supérieure. Ces deux identifications sont illustrées sur la Figure 3.7. Cette identification a également pour fonction de retracer l'orientation de la pièce dans l'espace de fabrication. Dans le cas de la pièce mince, le repère numérique est toujours orienté dans la direction Y+ du repère de la machine. Pour la pièce structurée, le code informatique est défini pour permettre la reconnaissance de l'orientation de la pièce. Le code est fait pour qu'il n'y ait qu'une orientation possible (donc pas de symétrie). L'information de l'orientation de la pièce n'est pas directement enregistrée sur la pièce mais dans le fichier de fabrication. Dans ce fichier, la position et l'orientation de chaque pièce sont sauvegardées.

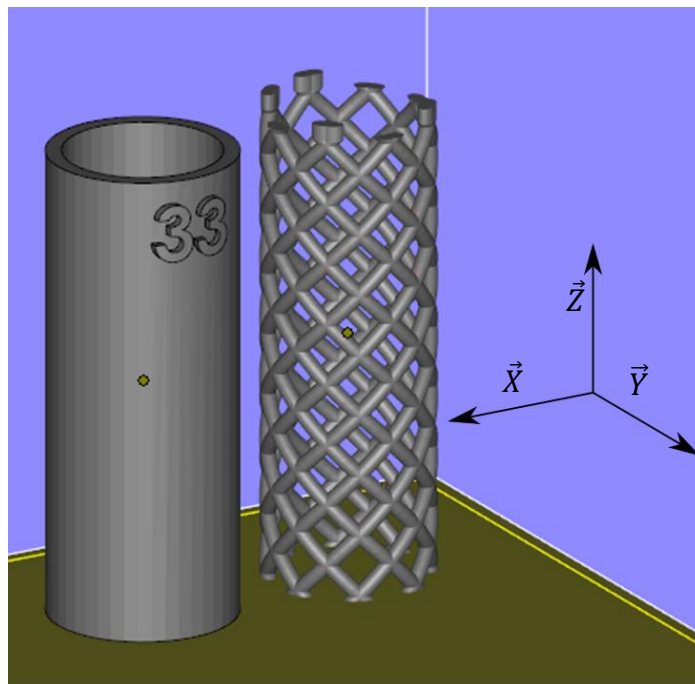


Figure 3.7 Illustration des identifications des éprouvettes

3.2.3 Méthode de contrôle des éprouvettes

Maintenant que le protocole de fabrication est déterminé, le protocole de contrôle des éprouvettes doit être établi. Pour les pièces minces, le défaut est situé dans la malformation de la première surface et pour les pièces treillis, la malformation des mailles contient l'information souhaitée. Il faut donc deux méthodes de contrôle adaptées à ces deux géométries différentes.

3.2.3.1 Contrôle des éprouvettes minces

La méthode proposée pour contrôler les éprouvettes minces consiste à mesurer la hauteur à l'aide d'un MicroVu (modèle Vertex). Il s'agit d'un appareil de métrologie optique qui présente certains avantages pour le contrôle des pièces issues de la fabrication additive. Il permet, entre autres, de « palper » une surface en faisant une mise au point de l'appareil optique sur la surface. Sa faible profondeur de champ focal permet une

bonne précision de mesure, elle est de 2 μm avec le zoom optique le plus grand. L'appareil permet également de détecter des contrastes et dans certaines configurations, le contour des objets. Ces deux aspects sont utiles pour notre méthode de contrôle des éprouvettes.

Le processus de contrôle des éprouvettes se fait en deux étapes : une étape d'initialisation qui consiste à créer un repère local sur la pièce à mesurer et une étape de mesure.

L'étape d'initialisation a pour objectif de créer un repère lié à la pièce pour que l'étape de mesure se fasse automatiquement. En partant du repère machine constitué d'une origine O et des axes $\vec{X}$, $\vec{Y}$ et $\vec{Z}$ noté $(O, \vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$, quelques opérations sont réalisées pour obtenir un repère local identique pour chaque pièce. Cette étape commence par le placement de la pièce sur le plateau de MicroVu avec la surface supérieure de l'éprouvette contre le plateau comme le montre la Figure 3.8. La surface supérieure est la dernière surface fabriquée, ce retournement permet donc de rendre visible la surface inférieure de la pièce par l'objectif du MicroVu. Le plan tangent côté extérieur matière de la surface supérieure nominalement plane est alors coïncident avec le plan $(O, \vec{X}, \vec{Y})$. Un premier repère local est créé en déplaçant l'origine au niveau de l'axe du cylindre. Pour cela, le contour interne de la pièce est détecté (voir Figure 3.9a) afin de recréer un cercle minimisant le défaut et dont le centre est la nouvelle origine ; le nouveau repère temporaire est $(O', \vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$. Ce repère est ensuite réorienté par rotation selon l'axe $\vec{Z}$ pour positionner le code numérique de la pièce selon le nouvel axe $\vec{Y}'$ (voir Figure 3.9b). Le repère ainsi créé est $(O', \vec{X}', \vec{Y}', \vec{Z})$.

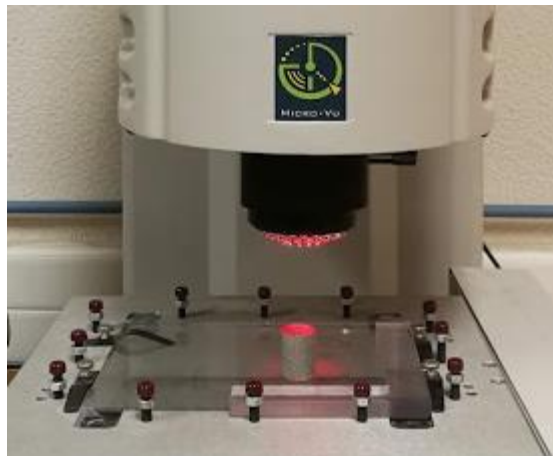


Figure 3.8 Le MicroVu et une éprouvette dans la configuration du contrôle

La validité de cette mise en position repose en partie sur la planéité de la surface supérieure et la perpendicularité de la partie cylindrique des pièces. Cette hypothèse est par la suite validée avec un défaut de forme d'au plus 11,8 μm et un défaut de perpendicularité d'au plus 0,21° mesurés sur trois pièces différentes (deux aux angles de l'espace de fabrication et une au centre) avec le MicroVu. Des défauts de cet ordre ne sont pas significatifs en comparaison des valeurs mesurées par la suite.

Une fois la pièce positionnée et repérée par la machine, l'étape de mesure peut commencer. Pour rappel, l'objectif est de caractériser la déformation de la surface inférieure et ce défaut se manifeste par un retrait de la matière lors de la fabrication. La caractérisation peut donc se faire en mesurant l'écart entre l'altitude des points palpés de la surface de la pièce et l'altitude attendue de 30 mm. Les mesures d'altitude sont réalisées sur vingt-quatre positions réparties angulairement tous les 15° et équidistantes du centre du repère. A chaque position, sept acquisitions espacées de quelques dizaines de microns sont réalisées. Les valeurs extrêmes sont éliminées pour supprimer certaines erreurs de mesure. En effet, des erreurs de mesure sont susceptibles d'apparaître lorsque l'éclairage n'est pas suffisant et que l'algorithme qui réalise la mise au point ne parvient pas à converger. Lorsque cela se produit avec le MicroVu, l'algorithme renvoie malgré tout une valeur, qui

souvent est aberrante. C'est pour éviter ce type de valeur que les valeurs extrémales des sept acquisitions sont éliminées. Ce type d'erreur reste occasionnel et cette approche permet de s'assurer de ne pas retrouver d'erreur de mesure dans les acquisitions finales. Les variations pour les cinq acquisitions suivantes ne sont générées que par la rugosité de la pièce. La moyenne de ces cinq valeurs est conservée, réduisant ainsi en partie l'impact de la rugosité sur la valeur retenue.

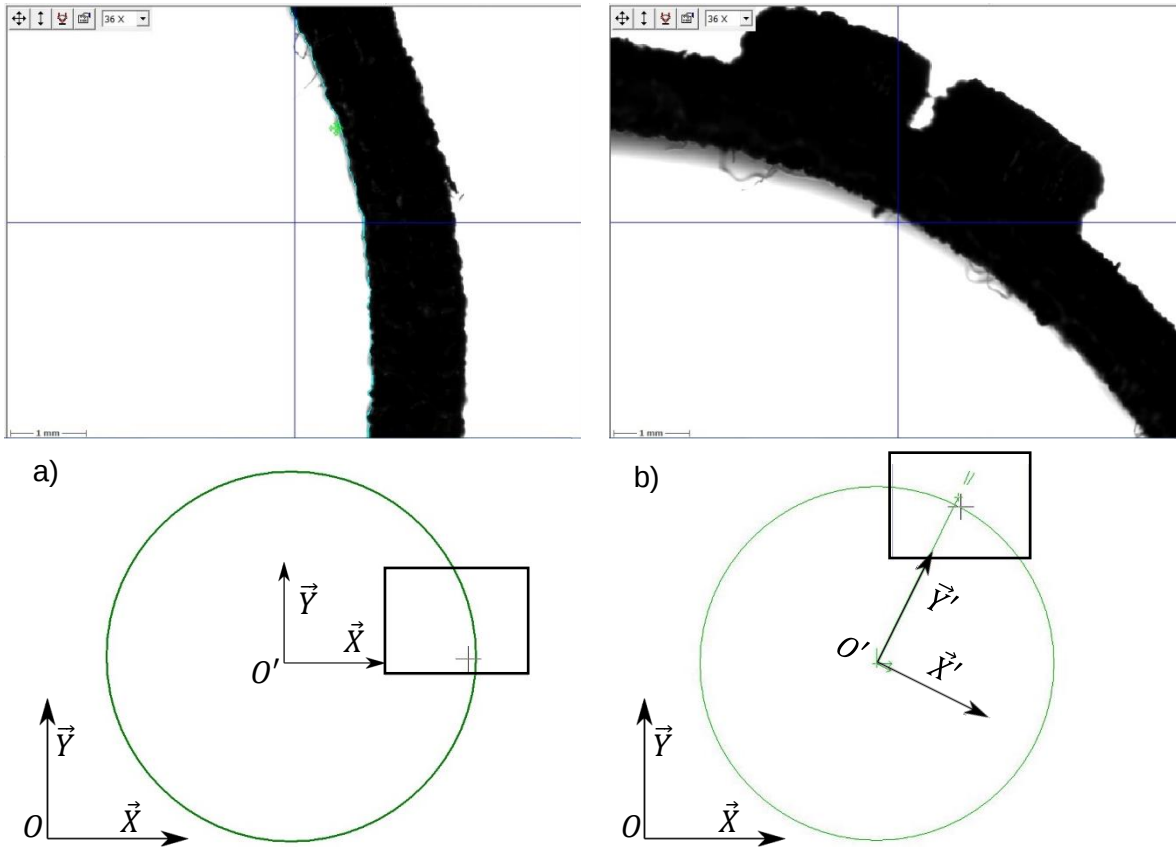


Figure 3.9 Création d'un repère local propre à la pièce mesurée avec la détection du contour intérieur (a) pour créer l'origine du repère et de l'identifiant (b) pour orienter le repère

3.2.3.2 Contrôle des éprouvettes structurées

Pour les éprouvettes structurées, la malformation des mailles est représentative du défaut. Et le nombre de mailles malformées sur une même rangée (voir Figure 3.11) est représentatif de la hauteur de pénétration du défaut dans la pièce. Ainsi, pour chaque position angulaire, le nombre de mailles malformées est l'information choisie pour caractériser le défaut.

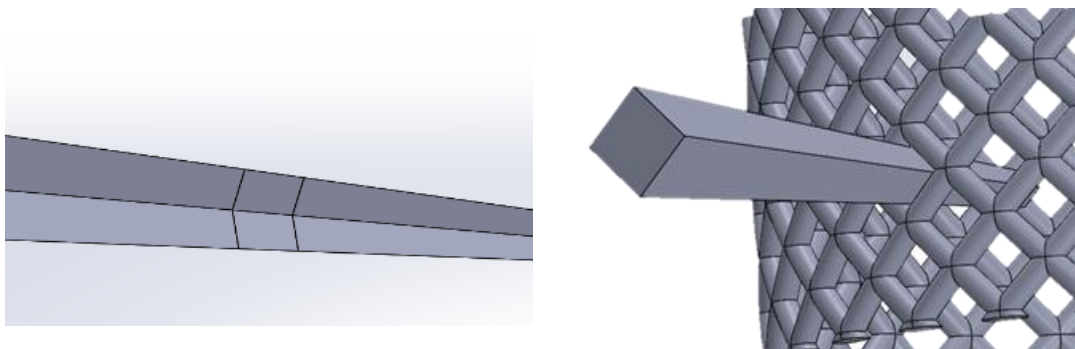


Figure 3.10 Gabarit de test des mailles (à gauche) et exemple de test (à droite)

Afin de confirmer qu'une maille est malformée, un gabarit est utilisé. Ce gabarit a une forme pyramidale, et il est marqué de deux repères (voir Figure 3.10). Ces repères permettent d'évaluer la malformation de la

maille, ils correspondent à la dimension d'une maille $\pm 5\%$. Si la première maille dépasse lorsque le gabarit est inséré, cette maille est trop petite. A l'inverse, si la deuxième ne dépasse pas, la maille est trop grande. La marge entre les deux repères correspond à la tolérance géométrique atteignable par la technologie EBM sur ce type de géométrie. Elle a été étalonnée avec des mailles conformes et permet ainsi d'éviter de fausse détection mais suffit à repérer facilement les mailles les moins conformes.

Le protocole de mesure est le suivant : pour chaque rangée de mailles (voir Figure 3.11), les mailles sont évaluées en partant de la première maille fabriquée et la valeur du rang de la dernière maille malformée est relevée. Dans le cas de la Figure 3.11, la maille 1 est incomplète, la partie inférieure est absente (perte de matière) elle est donc non valide. Les mailles 2, 3 et 4 sont malformées et à partir de la maille 5 les mailles sont conformes. Pour cette position angulaire la valeur 4 est retenue.

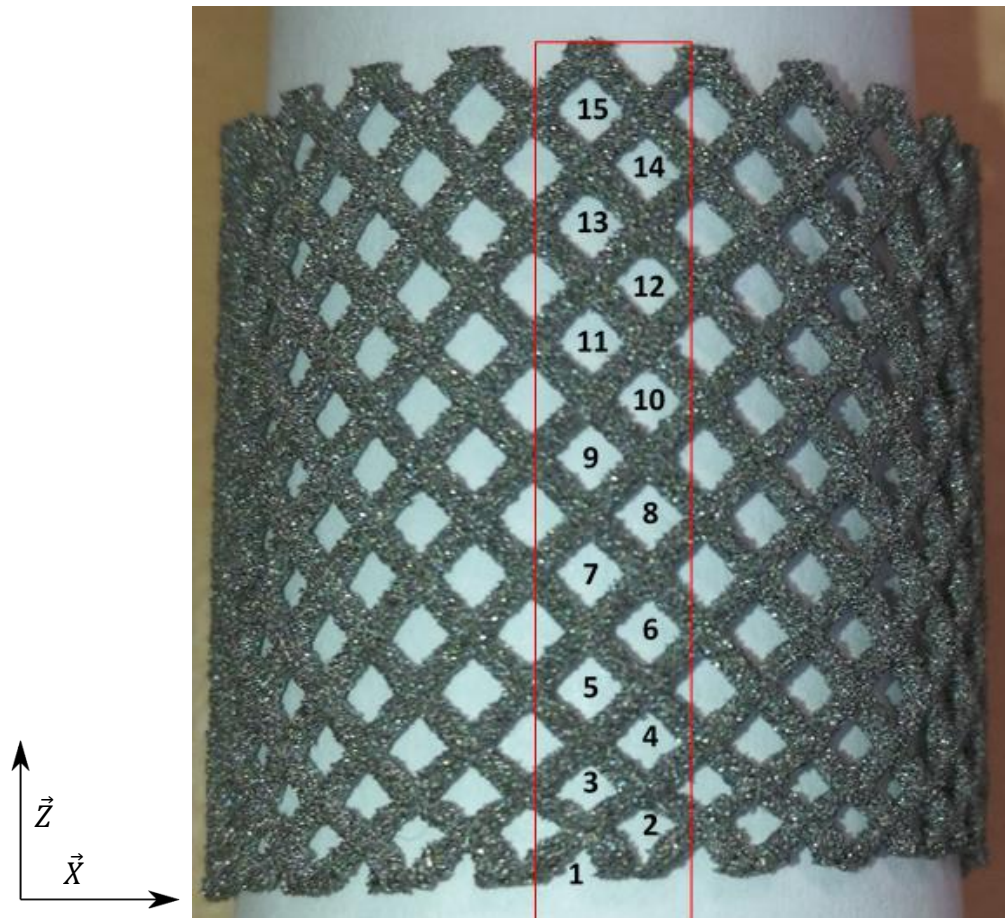


Figure 3.11 Epreuve structurée défectueuse présentant une rangée de mailles (encadrée en rouge) numérotées dans l'ordre de fabrication (ordre de contrôle également).

3.3 Résultats et analyse

3.3.1 Résultats

3.3.1.1 Représentation graphique des résultats

La représentation graphique des résultats est faite à l'aide d'un graphique de type radar (Figure 3.12). Ce type de graphique permet de visualiser l'intensité du défaut pour chaque position angulaire et il a l'avantage de montrer si une orientation est privilégiée pour le défaut. Par exemple, sur la Figure 3.12, le quart supérieur gauche (positions angulaires de 0 à 6) présente des écarts plus élevés que le quart inférieur droit (12 à 18). Les acquisitions donnent des écarts proches de 0 pour le quart inférieur droit et allant jusqu'à 3 mm pour le quart supérieur gauche. Cela montre que le défaut a une direction préférentielle à l'échelle de la pièce.

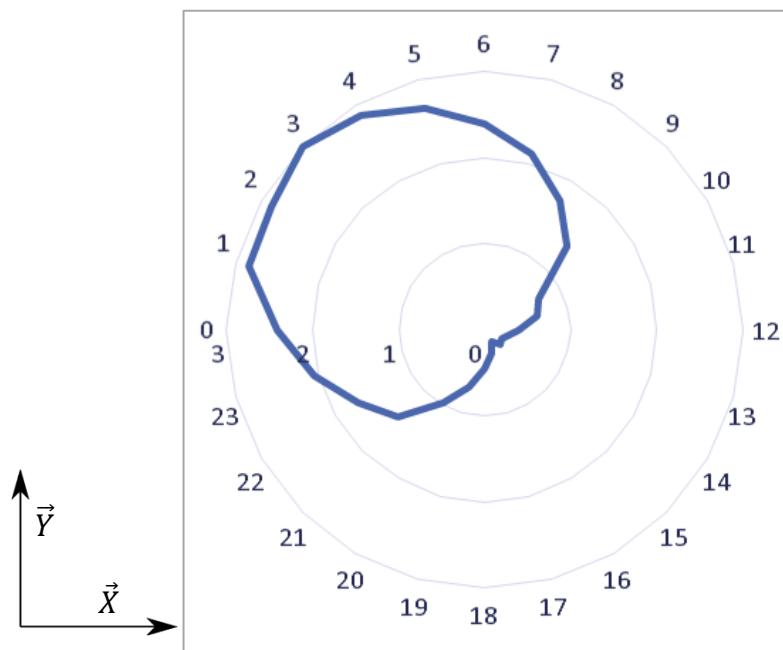


Figure 3.12 Défaut (en mm) pour chaque position angulaire d'une pièce

De la même manière, le défaut des pièces structurées est représenté sous la forme de radar en indiquant la hauteur de la dernière maille malformée pour chaque position angulaire. Sur la Figure 3.13 la première rangée de maille est intégralement défectueuse. En revanche, sur le quart inférieur droit, le défaut ne dépasse pas la première rangée, il se propage graduellement sur le quart supérieur droit et le quart inférieur gauche pour atteindre son paroxysme au quart supérieur gauche. En effet, les trois premières rangées de mailles du quart supérieur gauche sont malformées avec un pic sur la quatrième rangée à la position angulaire repérée au numéro 9.

Pris un à un, ces graphiques révèlent une information sur l'importance du défaut et sa localisation sur la pièce. Juxtaposer le radar de chaque pièce permet de représenter les défauts sur l'intégralité de l'espace de fabrication. Cette représentation permet également de corréler la position dans l'espace de fabrication avec la position du défaut sur les pièces fabriquées.

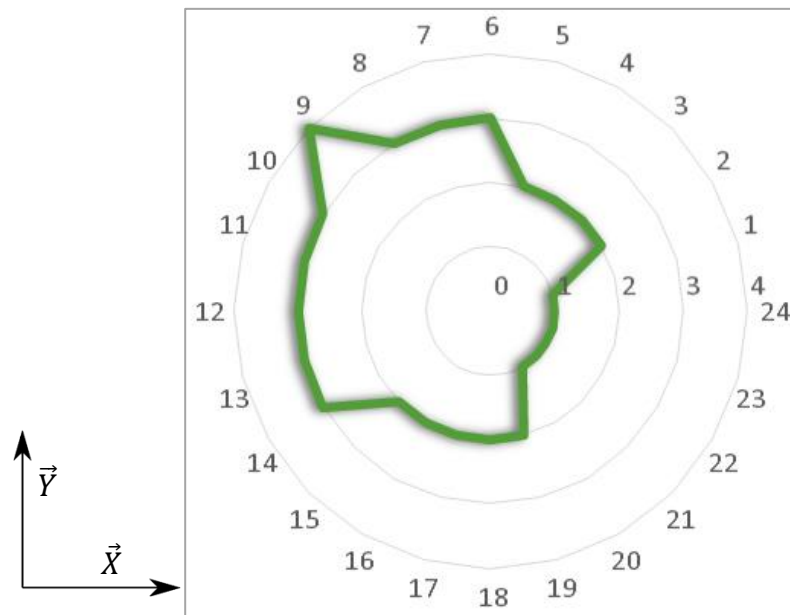


Figure 3.13 Nombre de mailles défectueuses pour chaque position angulaire

3.3.1.2 Cartographie de l'espace de fabrication

La Figure 3.14 illustre la cartographie des écarts mesurés sur l'espace de fabrication. Les écarts mesurés sur les pièces minces de diamètre 30 mm sont présentés en bleu et en vert de diamètre 20 mm.

Les pièces de diamètre 10 mm ne sont pas représentées pour deux raisons. D'abord, leur géométrie est moins adaptée au protocole de mesure : les pièces basculent lorsque le plateau du MicroVu se déplace, et l'ajout de pièce de maintien perturbe l'étape de création du repère local. La mesure est donc moins automatique et demande un temps additionnel non négligeable. La deuxième raison est que les résultats obtenus sur les premières pièces mesurées ne présentent pas de disparité majeure. En fait, les résultats obtenus sont relativement semblables quelle que soit la pièce mesurée et n'apporte donc pas d'informations sur le graphique suivant.

Les résultats présentés sur la Figure 3.14 montrent que les défauts de hauteur ne sont pas uniformes sur tout l'espace de fabrication. Les pièces en bordure de l'espace de fabrication présentent des défauts plus importants que les pièces fabriquées au centre. Les écarts de hauteur mesurés sur les pièces en périphérie de l'espace de fabrication peuvent atteindre 3 mm. En revanche les pièces situées au centre de l'espace de fabrication n'ont jamais plus de 1 mm d'écart mesuré. Sur la Figure 3.15, la malformation des premières couches est apparente avec la pièce fabriquée en bordure de l'espace de fabrication alors que la pièce fabriquée au centre ne présente pas de défaut visible.

Ensuite, en regardant chaque pièce, le défaut est toujours plus important sur les parties de la pièce les plus proches des limites de l'espace de fabrication. La Figure 3.14 le montre clairement avec les pièces situées aux quatre coins de l'espace de fabrication : les écarts les plus importants sont toujours aux positions les plus éloignées du centre de l'espace de fabrication.

L'observation et la mesure de ces écarts montrent donc que le défaut est réellement plus apparent en s'éloignant du centre de l'espace de fabrication. Les pièces qui sont fabriquées au centre présentent des défauts du même ordre que ceux présents sur les surfaces surplombantes en général. Les pièces qui sont en périphérie présentent quant à elles jusqu'à 3 mm d'écart entre la pièce conçue et la pièce fabriquée. Les résultats ne dépendent pas de la hauteur de fabrication, des résultats semblables ont été obtenus à différentes hauteurs.

Maîtrise de la Qualité en Fabrication Additive

Etude de l'homogénéité de l'espace de fabrication

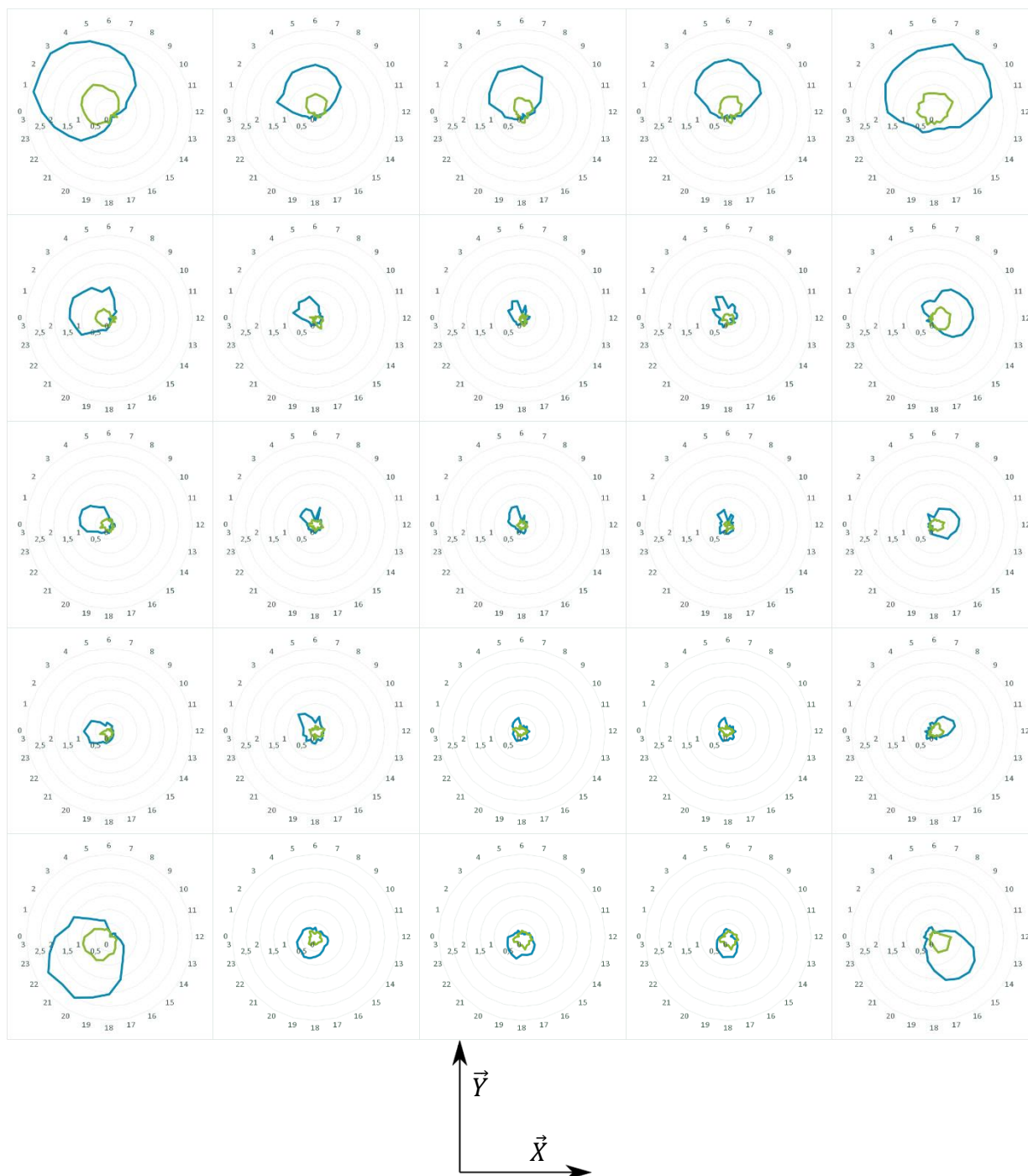


Figure 3.14 Cartographie des écarts mesurés sur les pièces pleines (Ø30 mm : bleu ; Ø20 mm : vert)



Figure 3.15 Photo de pièces minces fabriquées au centre de l'espace de fabrication (à gauche sur la photo) et au coin supérieur gauche de l'espace de fabrication (à droite sur la photo)

La Figure 3.16 présente la cartographie des défauts pour les pièces structurées. Pour rappel, les radars représentent pour chaque position angulaire le nombre de mailles malformées. Donc plus la courbe est éloignée du centre, plus le défaut est présent à cette position de la pièce. Le premier point remarquable est l'absence totale de défaut sur les pièces situées au centre de l'espace de fabrication. Dès les premières mailles, la fabrication des neuf pièces concernées est sans défauts dans cette partie de l'espace de fabrication.

Les pièces situées en périphérie de l'espace de fabrication présentent en revanche toutes des mailles malformées. Le défaut est présent jusqu'à la quatrième rangée dans certains cas (aux angles principalement) ce qui correspond à une hauteur d'environ 8mm.

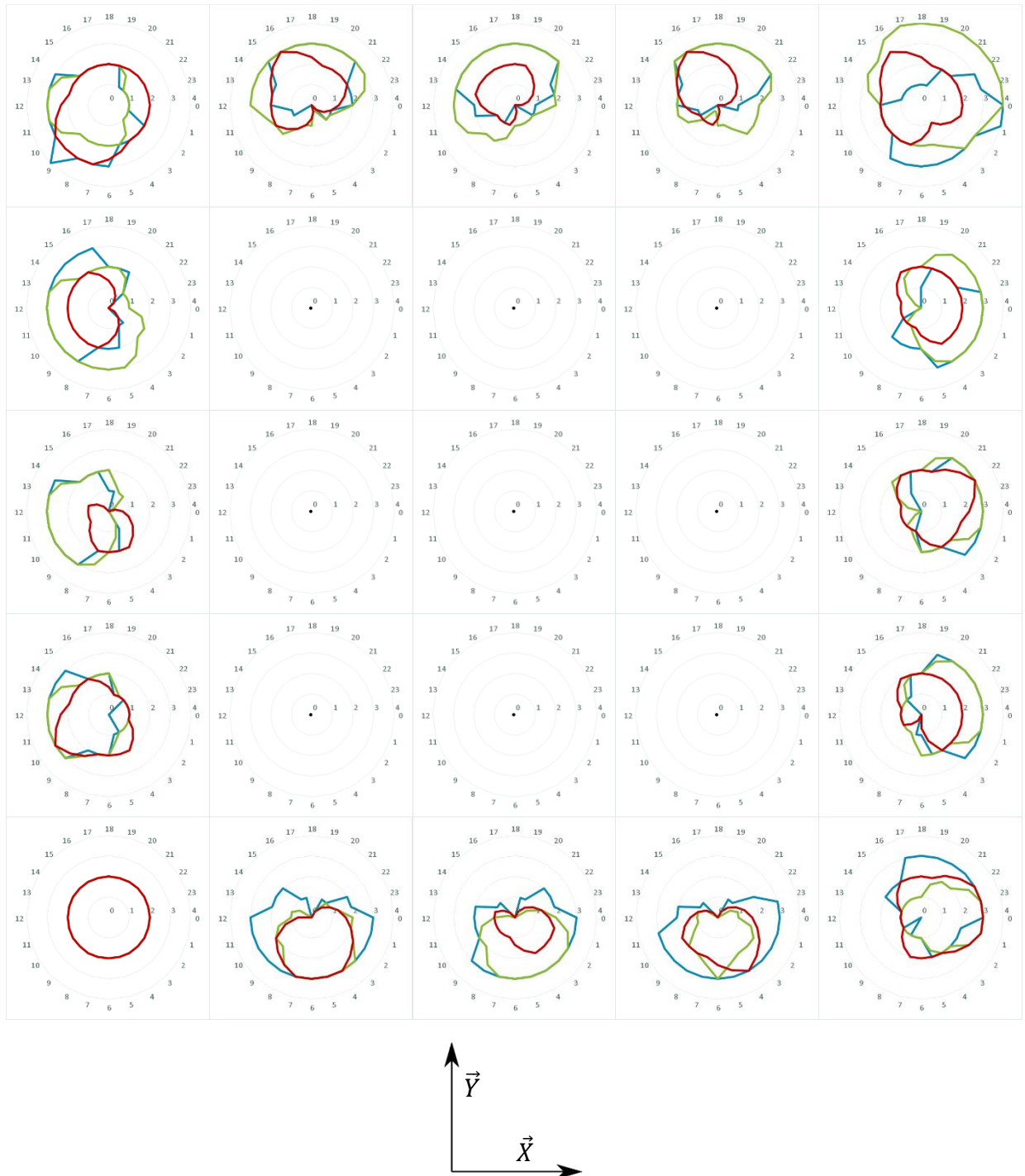


Figure 3.16 Cartographie de la hauteur de pénétration de la déformation
($\varnothing 30$ mm : bleu ; $\varnothing 20$ mm : vert ; $\varnothing 10$ mm : rouge)

3.3.2 Analyse

3.3.2.1 Analyse des résultats

L'expérimentation met clairement en avant une disparité dans la qualité géométrique des pièces fabriquées. Des résultats obtenus, nous pouvons conclure que : la périphérie du plan de fabrication est source de défaut, en opposition avec le centre du plan de fabrication qui ne montre que de faibles défauts.

Pour entrer plus dans les détails, les valeurs des écarts sur la hauteur des tubes minces sont comprises entre - 0,018 mm (soit une hauteur mesurée de 30,018 mm) et 2,996 mm (soit une hauteur mesurée de 27,004 mm). Sur la Figure 3.17 sont représentés tous les écarts mesurés en fonction de la distance entre le point palpé dans l'espace de fabrication et le centre du plan de fabrication. Les résultats contiennent quatre lots de pièces minces. Conformément aux observations précédentes, les points les plus loin du centre de l'espace de fabrication présentent les défauts les plus importants.

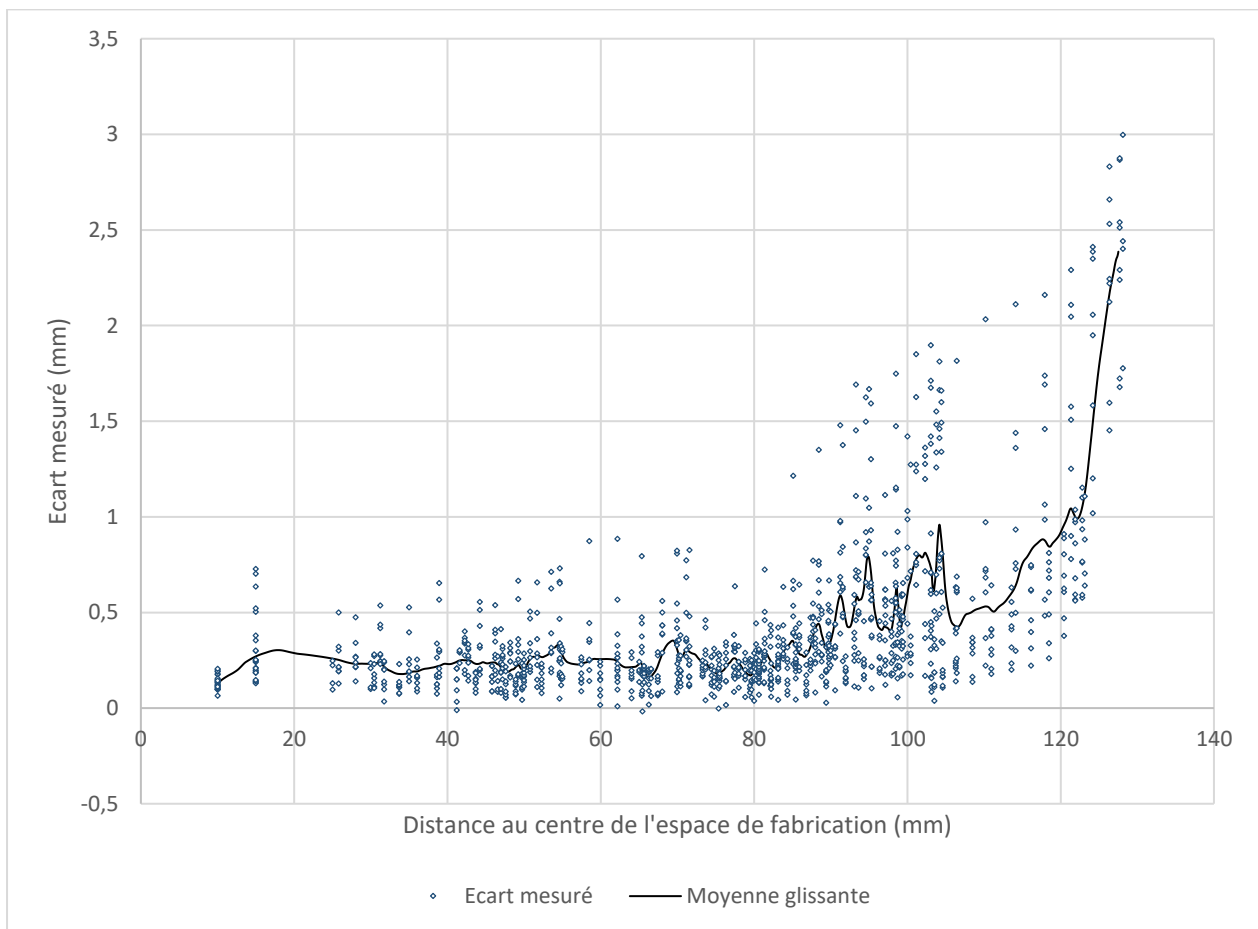


Figure 3.17 Défauts mesurés en fonction de la distance entre le centre du plan de fabrication et le point mesuré

Une moyenne glissante a été ajoutée sur la Figure 3.17, elle est représentée par la courbe noire. Cette moyenne glissante est faite sur quarante points consécutifs. Encore une fois, et toujours en accord avec nos observations, les valeurs les plus élevées de la moyenne glissante sont les plus éloignées du centre de l'espace de fabrication et les valeurs les plus faibles sont toutes proches du centre. Cette moyenne montre que le phénomène n'est pas le fruit de mesures ponctuelles mais bel et bien une tendance générale.

3.3.2.2 Caractérisation de l'homogénéité

Sur la Figure 3.17, les mesures se scindent en deux régions distinctes. Dans la première région, de 0 à 85 mm, les mesures sont concentrées entre 0 et 1 mm et la moyenne glissante est relativement constante sur tout l'intervalle. Les défauts observés sont homogènes et principalement dus à l'absence de supports. Puis,

dans la seconde région, au-delà de 85 mm, les écarts sont plus élevés et la moyenne glissante est croissante. Les défauts observés sont alors hétérogènes, le seul manque de supports n'explique pas cette différence.

En comparant avec les tubes structurés, la première région correspond à une zone sans maille malformée. Le premier défaut apparaît dans une maille située à 86 mm du centre du plan de fabrication. Ce défaut ainsi que tous les autres défauts des pièces structurées se situent dans la seconde région. Sur la Figure 3.17, la moyenne dépasse significativement les autres moyennes calculées dans la première région à 88 mm de distance du centre. Le premier écart supérieur à ceux mesurés dans la première région apparaît à 86 mm de distance du centre. Toutes ces informations permettent de déduire qu'à partir de 86 mm, la qualité géométrie des pièces fabriquées est affectée par leur position dans l'espace de fabrication.

D'après nos observations et nos analyses, l'espace de fabrication se divise en deux parties : une partie de l'espace de fabrication impacte de manière hétérogène la qualité géométrique des pièces tandis que l'autre conserve des propriétés semblables en tous points. Cette seconde partie est définie sur le plan de fabrication par un disque de 86 mm de rayon centré sur le plan.

3.3.2.3 Les causes potentielles

Nous avons montré précédemment que les écarts de hauteur et les malformations de mailles n'étaient pas répartis aléatoirement sur l'espace de fabrication et que la position d'une pièce sur l'espace de fabrication a un impact important sur sa qualité géométrique. Nous allons maintenant identifier les causes possibles.

Outre les résultats et les analyses faites, une piste de réflexion se dégage lors d'une des fabrications. Un groupe de pièces structurées a été affecté par un défaut différent des autres pièces. La base du groupe a été décalée de 2 mm pendant la production. Ce décalage, photographié sur la Figure 3.18, concerne les 2 premiers mm fabriqués du groupe de pièces et il est orienté dans la direction de l'axe $\vec{X}$. Cette orientation suggère une implication du râteau dans le déplacement : le râteau balaye selon l'axe $\vec{X}$ le plan de fabrication. Ce groupe de pièces était positionné dans un coin de l'espace de fabrication (en bas à gauche sur la Figure 3.16). La première piste sur l'origine du défaut dans l'espace de fabrication met donc en jeu le râteau : lors de son passage, le râteau peut mécaniquement déplacer des poudres et des pièces provoquant ainsi des défauts géométriques sur les pièces.

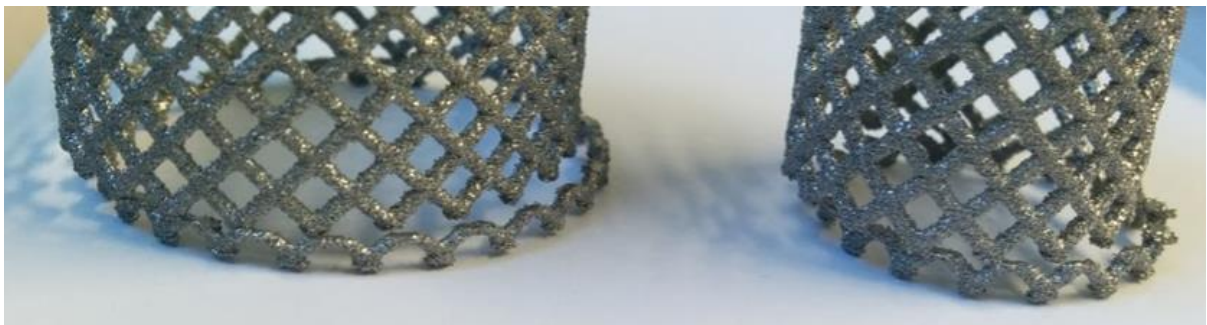


Figure 3.18 Photo du déplacement latéral des premières couches fabriquées sur les tubes de 30 et 20 mm

Cependant, le râteau effectue un passage uniforme sur tout l'espace de fabrication. Il ne peut pas être seul à l'origine des écarts de hauteur et des malformations qui ne sont pas répartis uniformément sur l'espace de fabrication. Le faisceau d'électrons peut être une cause de cette hétérogénéité. En effet, le pilotage du faisceau d'électrons est normalement semblable de part et d'autre du plan de fabrication, lors de la phase de *preheat* et lors de la phase de *melt*. Cependant, l'incidence du faisceau d'électrons sur le lit de poudre n'est pas la même au centre de l'espace de fabrication et en périphérie. Ainsi, lorsque le faisceau d'électrons est au centre de l'espace de fabrication, il est orthogonal au lit de poudre, alors que dans les coins, il est incliné de quelques degrés (environ une dizaine d'après les dimensions de l'Arcam A1). Cela peut avoir comme

conséquence d'apporter de l'énergie différemment à la poudre (taille et forme de spot différentes, plus ou moins d'électrons absorbés, etc.). Cette inclinaison pourrait également avoir des conséquences sur la précision et la forme de la piscine de fusion. L'inclinaison du faisceau constitue donc une hypothèse pour expliquer la variation des défauts géométriques en fonction de la position des pièces dans l'espace de fabrication.

Une autre hypothèse concerne les transferts thermiques à la frontière entre l'espace de fabrication et l'enceinte de la machine. La poudre située aux limites de l'espace de fabrication est en contact avec les parois métalliques de la machine situées sur les côtés et avec la plaque de départ en dessous. Ces éléments ne sont pas isolés thermiquement du reste de la machine et sont donc plus froids que l'espace de fabrication. Une partie de la chaleur de la poudre leur est donc transmise. Cependant, la poudre n'est pas un très bon conducteur thermique et l'absorption de l'énergie peut se faire de manière hétérogène. Ainsi, la poudre située en contact avec les parois latérales est susceptible de se refroidir plus vite et donc d'être à une température inférieure pendant la fabrication des pièces.

Cette hypothèse se vérifie à plusieurs reprises dans la littérature et plusieurs études s'intéressant à la thermique de la fabrication montrent une diminution de la température de la poudre à la périphérie de l'espace de fabrication [Cheng & al. 2014 ; Dehoff & al. 2015 ; Dinwiddie & al. 2013 ; Sames & al. 2016]. Dans une étude de Rodriguez & al. un gradient de température est observé à la surface du plan de fabrication. Une photo infrarouge l'illustre sur la Figure 3.19 [Rodriguez & al. 2012]. Le lot représenté contient plusieurs barres de traction à section circulaire ainsi que de la poudre consolidée. La poudre dans les coins est plus froide que celle au centre. En partant du centre de l'espace de fabrication, une zone uniforme de température est observée, suivie du gradient de température. Les quatre pièces entourées sur la Figure 3.19 sont situées à la périphérie de l'espace de fabrication, elles présentent une variation de température. Cette variation est une surchauffe, causée par une mauvaise dissipation de la chaleur dans la pièce et dans la poudre [Rodriguez & al. 2012].

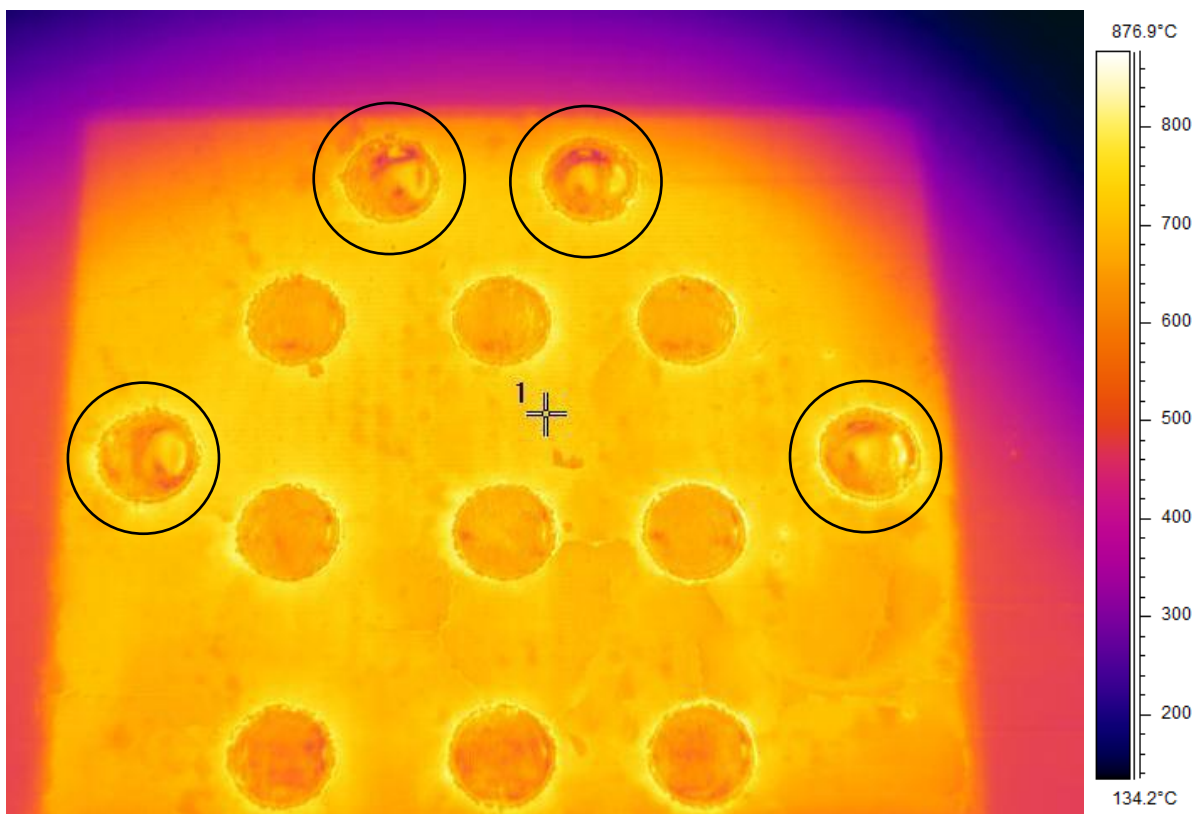


Figure 3.19 Image infrarouge de la surface d'une couche [Rodriguez & al. 2012]

D'autres analyses ont montré que la poudre consolidée est plus fragile aux coins de l'espace de fabrication qu'au centre. Cette différence de résistance mécanique se manifeste en manipulant la poudre consolidée après une fabrication. Un morceau de poudre pris en bordure de l'espace de fabrication s'effrite par simple pression des doigts ce qui n'est pas possible pour un morceau pris au centre de l'espace de fabrication. Pour en savoir plus, nous nous sommes intéressés de plus près à la poudre consolidée et deux échantillons ont été analysés par tomographie. Les images obtenues par tomographie sont en nuances de gris avec la poudre en blancs et les pores en noirs. Un seuil est défini pour délimiter les nuances de gris appartenant à la matière (blanc) et celles appartenant au vide (noir). La poudre reste suffisamment poreuse pour que le signal ne soit pas trop bruité et que cette méthode fonctionne.

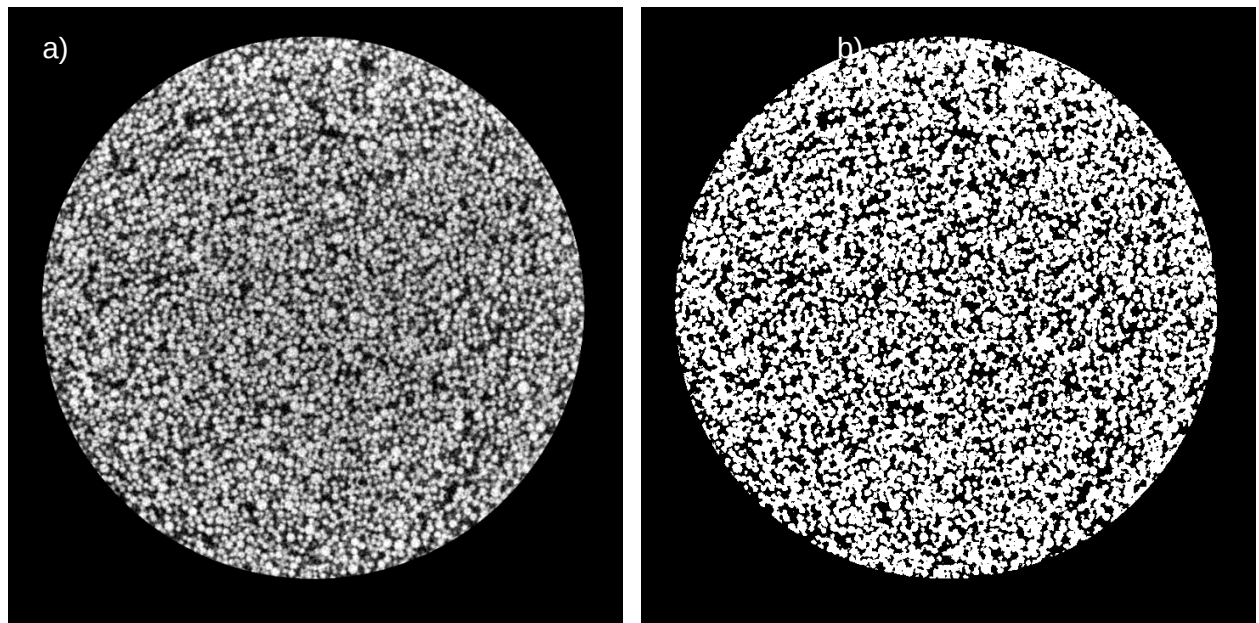


Figure 3.20 Exemple de transformation d'image brute (a) en image seuillée (b)

La Figure 3.20 est une illustration de l'application du seuillage d'une image issue d'une tomographie de poudre. Il suffit ensuite de compter le nombre de pixels blancs par rapport au nombre total de pixels dans la zone concernée pour avoir une bonne approximation de la densité de l'échantillon. Les résultats sont issus de 800 images (telles que celle sur la Figure 3.20) pour chaque échantillon. Les résultats obtenus sont la porosité moyenne et l'écart type entre les images pour les deux échantillons, ils sont présentés dans le Tableau 3.1. Les résultats montrent une différence importante de densité de la poudre entre le centre et la périphérie de l'espace de fabrication. Le centre est donc plus dense, avec une porosité de 37,8 %, que la périphérie avec 41,3 % de porosité. L'écart type est également plus important pour l'échantillon pris en périphérie de l'espace de fabrication.

Tableau 3.1 Porosité mesurée sur deux échantillons de poudre

Echantillon	Centre	Périphérie
Porosité (en %)	37,8	41,3
Ecart Type (en %)	1,36	1,92

La poudre de Ti-6Al-4V fournie par Arcam a une masse volumique de $2,70 \text{ g.cm}^{-3}$ [Gong & al. 2014]. Relativement à la masse volumique du Ti-6Al-4V brut, la poudre a donc une densité de 61 % (i.e. 39 % de porosité). Comparativement à la densité de la poudre libre, la poudre consolidée centrale est plus dense et la poudre consolidée périphérique est moins dense. Le résultat est plutôt cohérent pour la poudre centrale, la

préchauffe de la poudre permet de densifier la poudre. En revanche, le résultat obtenu pour la poudre en périphérie semble curieux : pourquoi la poudre est-elle moins dense après consolidation ? De même, l'écart type plus important à la périphérie montre que la répartition des poudres est plus variable sur cet échantillon.

Finalement, ces analyses mènent à penser que la phase de chauffe de la poudre (preheat) n'affecte pas de manière homogène le lit de poudre. Le contact entre l'espace de fabrication et son enceinte génère un gradient de température sur la périphérie de l'espace de fabrication. Comme la poudre est plus froide sur la périphérie de cet espace et que le faisceau d'électrons ne compense pas ce phénomène et apporte la même énergie sur toute la surface, la consolidation ne se fait pas dans les mêmes conditions et elle est moins avancée qu'au centre de l'espace de fabrication. La formation des cous entre les poudres se fait par effet joule : la charge électrique des grains de poudre se transmet par contact direct entre les grains et fait fondre le point de contact par effet joule. Plus la température initiale est élevée, plus la température atteinte par la diffusion électrique est haute et plus la fusion entre les poudres est importante. Conséquemment les cous entre les poudres sont plus fins et plus rares dans la périphérie. A ce stade de consolidation qui correspond à la première phase de frittage [Olmos, 2009], il y a une corrélation directe entre conductivité, résistance mécanique et densité. La périphérie de l'espace de fabrication est donc moins conductrice et moins résistante. Alors, pendant le ratissage, la poudre périphérique contenue dans les couches inférieures est plus susceptible d'être entraînée par le déplacement du râteau. Cette combinaison de phénomène explique à la fois le gradient thermique, la malformation des pièces en périphérie et également le déplacement de matière observé à la Figure 3.18.

D'après nos hypothèses et observations, l'impact hétérogène de l'espace de fabrication sur la qualité géométrique des pièces est influencé par les fuites énergétiques au travers de l'enceinte de l'espace de fabrication et le ratissage des couches de poudre. Cela explique les défauts observés mais n'explique pas que ces défauts ne soient observables que sur les premières couches des pièces. En effet, la malformation dans les pièces structurées n'affecte que les quatre premières mailles. Les premières couches des pièces fabriquées sont globalement plus chaudes en périphérie car la poudre est moins bien consolidée donc moins conductrice et ne permet pas de refroidir correctement la pièce. La poudre fondue se solidifie donc moins vite et sa température plus élevée facilite la déformation des premières couches de pièces lors du passage du râteau. Lorsque plusieurs couches d'une pièce ont été réalisées, l'énergie apportée à la poudre fondue se diffuse dans les premières couches de la pièce puis progressivement dans la poudre. Les premières couches de la pièce permettent alors de maintenir la poudre aux alentours de la pièce en un ensemble qui résiste au passage du râteau. Le défaut est ainsi atténué au fur et à mesure de la construction de la pièce ou alors il implique le déplacement de la poudre et de la pièce comme observé à la Figure 3.18 (où les premières couches de la pièce ont été déplacées pendant la production en un seul bloc dans l'espace de fabrication).

3.4 Perspectives et solutions

Dans les perspectives, deux solutions se détachent. La première est de trouver comment palier le problème et éviter de voir apparaître ces défauts lors de la fabrication des pièces. La seconde vise à modifier le fonctionnement de la machine pour retrouver une homogénéité de l'espace de fabrication et ainsi permettre un libre positionnement des pièces dans l'espace de fabrication. Si la première solution est nécessaire pour produire des pièces dans la configuration actuelle de la machine, la seconde est plus ambitieuse et rendrait la première caduque.

3.4.1 Garantir la qualité des pièces

Pour garantir la qualité géométrique des pièces, il existe plusieurs solutions simples à mettre en place.

La première solution consiste à fabriquer les pièces dans la zone homogène de l'espace de fabrication, c'est-à-dire un cylindre vertical de 86mm de rayon centré sur l'espace de fabrication. Cette solution apporte des résultats satisfaisants et les pièces fabriquées comme sur la Figure 3.21 sortent de production sans défauts. Cependant, cette restriction du volume disponible de l'espace de fabrication est préjudiciable à la productivité et à la capacité de la machine EBM.

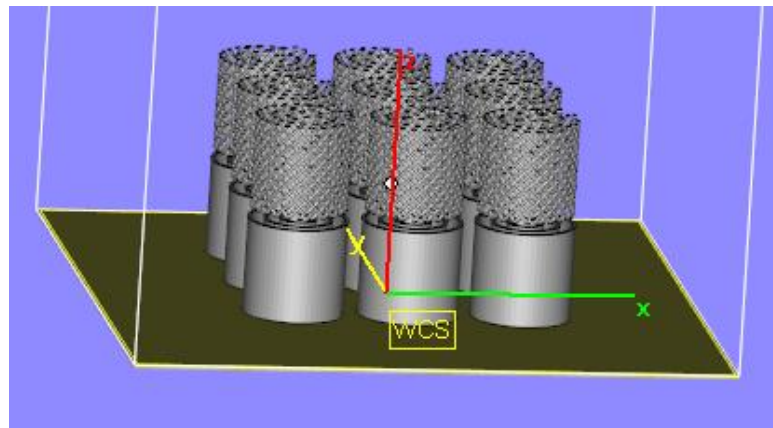


Figure 3.21 Illustration de la première solution : restriction de l'espace de fabrication

La seconde solution consiste à déplacer les défauts dans une partie rebut de la pièce. Dans notre cas, le supportage est parfaitement adapté à cette fonction. La stratégie de supportage proposée pour nos pièces consiste en un support continu sur la partie inférieure de la pièce, haut de 8 mm (hauteur maximale des défauts observés) et sans contact avec la plaque de départ. Sur un lot fabriqué dans ces conditions, les résultats obtenus sur les pièces en périphérie de l'espace de fabrication sont pleinement satisfaisants. Les défauts sont déplacés dans le support (voir la Figure 3.22) et la pièce est libre de toute malformation.

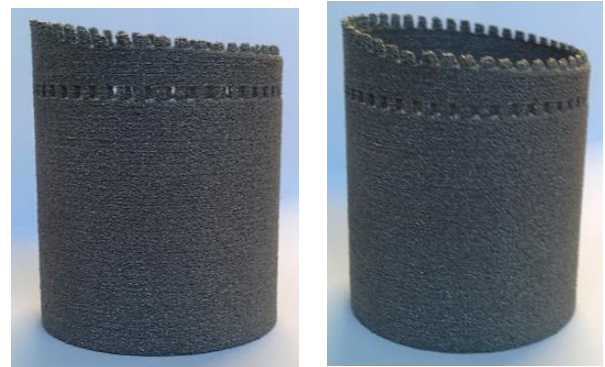
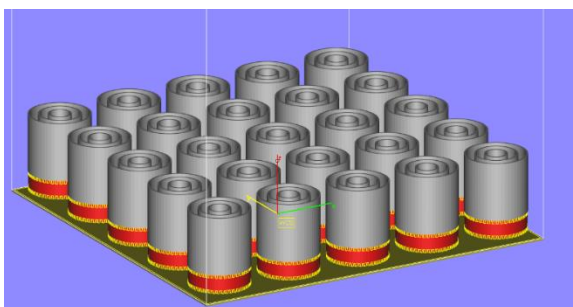


Figure 3.22 Illustration de la seconde solution : supporter les pièces (à gauche)
avec les résultats sur une pièce compromise (à droite)

La seconde solution est donc préférable, elle permet de conserver la totalité de l'espace de fabrication à l'exception du volume occupé par les supports. Il est cependant nécessaire de détacher les supports de la pièce a posteriori. Cela dit, les supports sont également utiles dans d'autres configurations (pièces massives, surfaces surplombantes importantes, ...). Les supports peuvent donc être multifonctionnels et nécessaires dans plusieurs configurations. De plus, le surcoût engendré par le supportage est généralement négligeable par rapport au coût total de revient d'une pièce [Vayre, 2014].

3.4.2 Homogénéiser les conditions de fabrication dans l'espace de fabrication

Les solutions vues précédemment permettent d'éviter la présence de défauts sur les pièces fabriquées. Mais elles ne permettent pas de s'affranchir totalement du problème. Les conditions de fusion dans l'espace de fabrication ne sont pas uniformisées et le risque d'avoir un défaut est toujours présent. De plus, l'hétérogénéité persiste et se fait par exemple ressentir dans le matériau [Tiferet & al. 2018]. Plusieurs pistes qui pourraient résoudre ce problème ont été identifiées.

D'abord, un des phénomènes responsables de l'hétérogénéité est le gradient thermique apparent à la surface du lit de poudre. Pour réduire le gradient thermique de la zone de fabrication, plusieurs solutions sont possibles. D'abord, il est possible de chauffer une surface plus grande de poudre pour déplacer le gradient de température. C'est déjà ce qu'il se passe dans la machine EBM car la surface chauffée est un carré de 210 mm de côté alors que la surface du lit de poudre fabriquable fait 200 mm de côté. Etendre cette surface au maximum permettrait potentiellement d'augmenter la taille de la zone sans défaut.

Une autre possibilité consiste à modifier la stratégie de préchauffe de la poudre (*preheat*) pour apporter plus d'énergie en périphérie de l'espace de fabrication et ainsi lisser le gradient thermique. Pour apporter plus d'énergie, il est possible d'augmenter l'intensité du faisceau, de ralentir la vitesse de balayage ou encore de réduire la distance entre deux lignes de fusion. Cependant, ces paramètres ne sont pas tous accessibles ou facilement pilotables via l'interface EBM Control 3.2 qui verrouille une partie de ces paramètres.

Il est également possible de modifier la phase de ratissage pour limiter le déplacement de la poudre. C'est une problématique souvent retrouvée dans les poudres fines et mobiles et notamment avec le procédé SLM. Une des solutions qui répondent bien à ce problème consiste à remplacer le râteau par un rouleau. Lors du contact avec le lit de poudre et les pièces en cours de fabrication qu'il contient, les efforts transmis par le râteau sont axiaux (selon $\vec{X}$ en général) et nous avons vu qu'ils peuvent déplacer des blocs de poudre assez importants pendant la production (Figure 3.18). Dans le cas du rouleau, les efforts sont plus faibles et ne sont pas orientés de la même manière : ils favorisent la compression de la poudre [Vayre & al. 2013].

La dernière possibilité identifiée demande de modifier la structure de la machine EBM afin de contrôler l'échange thermique entre la poudre et le reste de la machine. Pour y parvenir, il faut réduire au mieux les échanges thermiques entre les parois de l'espace de fabrication et la poudre. Alors, les échanges thermiques peuvent se faire uniformément par le bas de l'espace de fabrication. Cela rend possible le maintien d'une température uniforme à la surface du lit de poudre sans empêcher le refroidissement progressif du lot de pièces.

Même si ces propositions n'ont pas été expérimentées, elles sont au cœur des problématiques du procédé EBM avec l'Arcam A1. Cette hétérogénéité a par la suite été réduite par la modification des espaces de fabrication des nouvelles machines Arcam. En effet, les machines Q10, Q20 et Spectra H disposent d'espaces de fabrication cylindriques.

3.5 Conclusion

Dans cette étude, une des signatures du procédé EBM qui est source de défaut a été identifiée. Une méthode expérimentale a été proposée avec l'objectif de mettre en avant cette signature et de caractériser les défauts qui en découlent. La caractérisation des défauts a montré qu'il est possible d'obtenir des écarts dimensionnels de 3 mm et des malformations dans les 8 premiers mm des pièces. Une analyse plus approfondie montre qu'il existe une hétérogénéité dans l'espace de fabrication : le centre de l'espace de fabrication est plus dense et chaud que la périphérie. La poudre qui s'y trouve est alors plus résistante et conductrice permettant de meilleures conditions de fabrication. Enfin, des solutions ont été étudiées pour éviter les impacts de cette signature et des pistes visant à limiter (voire effacer) l'expression de cette signature ont été proposées.

Les déformations observées sont toutes obtenues avec une machine Arcam A1. Potentiellement, les espaces de fabrication des autres machines Arcam pourraient ne pas présenter cette signature et ces défauts. En effet, la géométrie des espaces de fabrication des machines Arcam a évolué vers une forme cylindrique. Les nouveaux fabricants de machine EBM se rapprochent également des conclusions de notre étude : la Qbeam Lab propose un espace de fabrication avec une isolation thermique plus importante que les machines Arcam [Lin, 2018].

Chapitre 4. Détection de porosité par l'ajout d'élément témoin

4.1 Introduction

4.1.1 La porosité en fabrication additive

En fabrication additive, la porosité est un défaut critique pour la qualité des pièces. Les pores sont susceptibles de fortement dégrader le comportement mécanique des pièces fabriquées. La littérature nous montre que les pores sphériques (en vert sur la Figure 4.1) ne représentent pas un danger critique pour le comportement mécanique des pièces [Suard, 2015]. En revanche, les pores plans (en rouge sur la Figure 4.1) sont susceptibles d'endommager grandement les propriétés des pièces fabriquées en statique [Galarraga & al. 2016] ainsi qu'en fatigue [Tammas-Williams & al. 2017].

Pour valider la qualité des pièces, et notamment s'assurer que leurs propriétés mécaniques sont valides, les pores doivent pouvoir être contrôlés et détectés. Dans ce contexte, l'objectif de détection se porte uniquement sur les pores plans et nous ne chercherons pas à contrôler les pores sphériques. Cette étude porte sur la recherche d'une solution idéale pour la détection de pores plans avec comme objectif un contrôle économique, rapide, précis et non destructif réalisé après production.

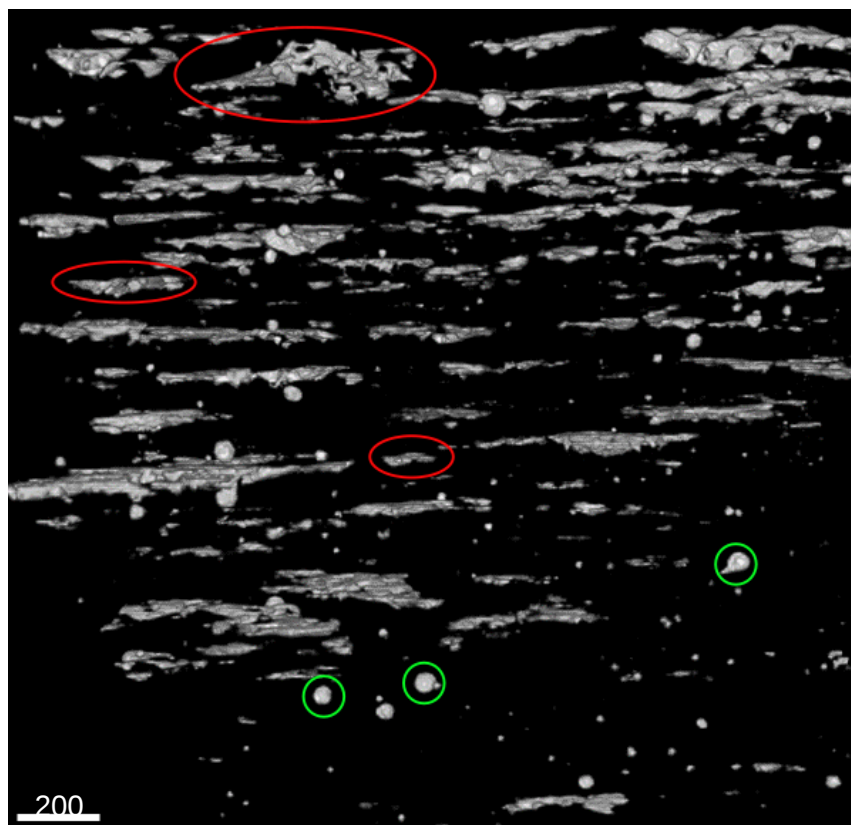


Figure 4.1 Représentation volumique des pores détectés par tomographie dans un échantillon de titane poreux contenant des pores sphériques (tels que ceux encerclés en vert) et plans (tels que ceux encerclés en rouge)

4.1.2 Problématique et structure du chapitre

La littérature montre que la détection et la mesure de la porosité des pièces n'est pas facile à mettre en œuvre par un moyen de contrôle non destructif. Les géométries complexes et la qualité d'état de surface des

pièces rendent l'utilisation des ultrasons impossible. La méthode d'Archimède comporte une limite importante : elle ne permet pas de détecter et mesurer les pores débouchants. Enfin la tomographie apporte une meilleure solution pour la précision de la mesure mais c'est un procédé peu abordable et les pièces de grandes dimensions ne peuvent être correctement analysées au tomographe. Le Ti-6Al-4V étant un matériau très absorbant, les tomographes permettent difficilement d'observer plus de 6 mm de matériau dense. Ces divers moyens de contrôle ne sont applicables que dans certains cas. Dans notre approche, nous visons un moyen de contrôle plus général, capable de qualifier le plus grand nombre de pièces possible.

En sachant que les pores plans sont formés par de mauvaises conditions de fusion au cours de la fabrication, l'idée proposée pour ce moyen de contrôle est de copier les conditions de fusion des pièces sur un élément témoin. Cet élément est conçu pour un contrôle de porosité rapide, efficace et précis. A la manière de Portolès & al. qui placent différentes éprouvettes de contrôle dans l'espace de fabrication pour qualifier une pièce sur les plans chimique, mécanique ou encore matériau [Portolès & al. 2016], ces éléments témoins devront permettre de contrôler la porosité après fabrication.

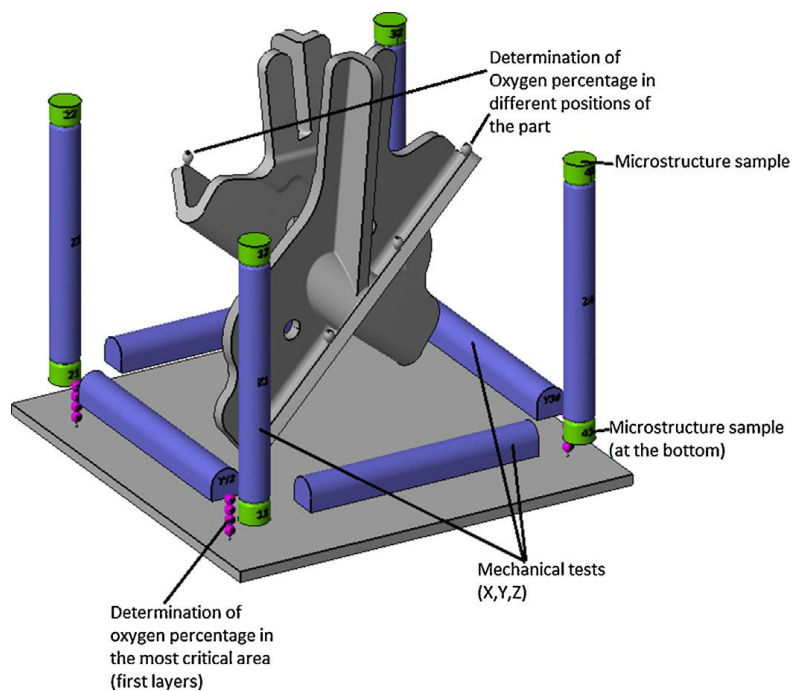


Figure 4.2 Espace de fabrication contenant une production ainsi que divers éléments de contrôle [Portolès & al. 2016]

Les éprouvettes proposées par Portolès & al. ne permettent pas dans leur disposition de contrôler la porosité du matériau. D'une part, elles ne sont pas fabriquées avec les mêmes conditions de fusion et, d'autre part, elles sont positionnées dans des zones hétérogènes de l'espace de fabrication. Elles ne peuvent pas être pleinement représentatives des conditions de fabrication de la pièce dans leur disposition Figure 4.2.

La question de la détection de porosité dans le cas de la fabrication de pièce par EBM amène plusieurs questions :

[1] Quelles sont les phénomènes et conditions de fabrication qui génèrent de la porosité dans la pièce ?

Pour répondre à cette première question, une analyse du procédé de fabrication est menée dans une première partie.

[2] Quelle méthode de contrôle du témoin ?

Cette question est abordée dans une seconde partie. Deux approches différentes sont alors abordées : un contrôle optique et un contrôle tomographique du témoin.

En s'appuyant sur les points relevés dans les deux parties précédentes, des méthodes sont proposées pour définir la position, la stratégie de fabrication ainsi que le design à donner au témoin pour chacune des approches de contrôle proposées. Ces méthodes sont ensuite évaluées au travers d'une campagne expérimentale.

[3] Comment reproduire ces phénomènes et conditions de fabrication sur un témoin ?

- i) Comment positionner le témoin dans l'espace de fabrication ?
- ii) Quelle stratégie de fabrication faut-il adopter pour que le témoin soit représentatif de la pièce ?

Enfin, la critique des méthodes proposées et des résultats obtenus est présentée en conclusion du chapitre.

4.2 Analyse du procédé

Le procédé EBM est susceptible de générer de la porosité dans les pièces. Dans cette analyse du procédé, l'objectif est d'identifier les paramètres et les différents phénomènes susceptibles d'altérer la densité des pièces pendant la fabrication en phase de *hatching*.

4.2.1 La stratégie de balayage

La stratégie de balayage définie pour la phase de *hatching* a un impact important sur la génération de porosité. Cela a été montré dans les travaux de Tammas-Williams & al. au travers d'une campagne expérimentale sur différentes stratégies et une analyse tomographique de cubes fabriqués avec ces stratégies [Tammas-Williams & al. 2015]. Dans notre cas, le champ d'étude est réduit à la stratégie de fabrication classique de EBM Control 3.2. Le balayage est donc fait selon le schéma classique présenté sur la Figure 4.3.

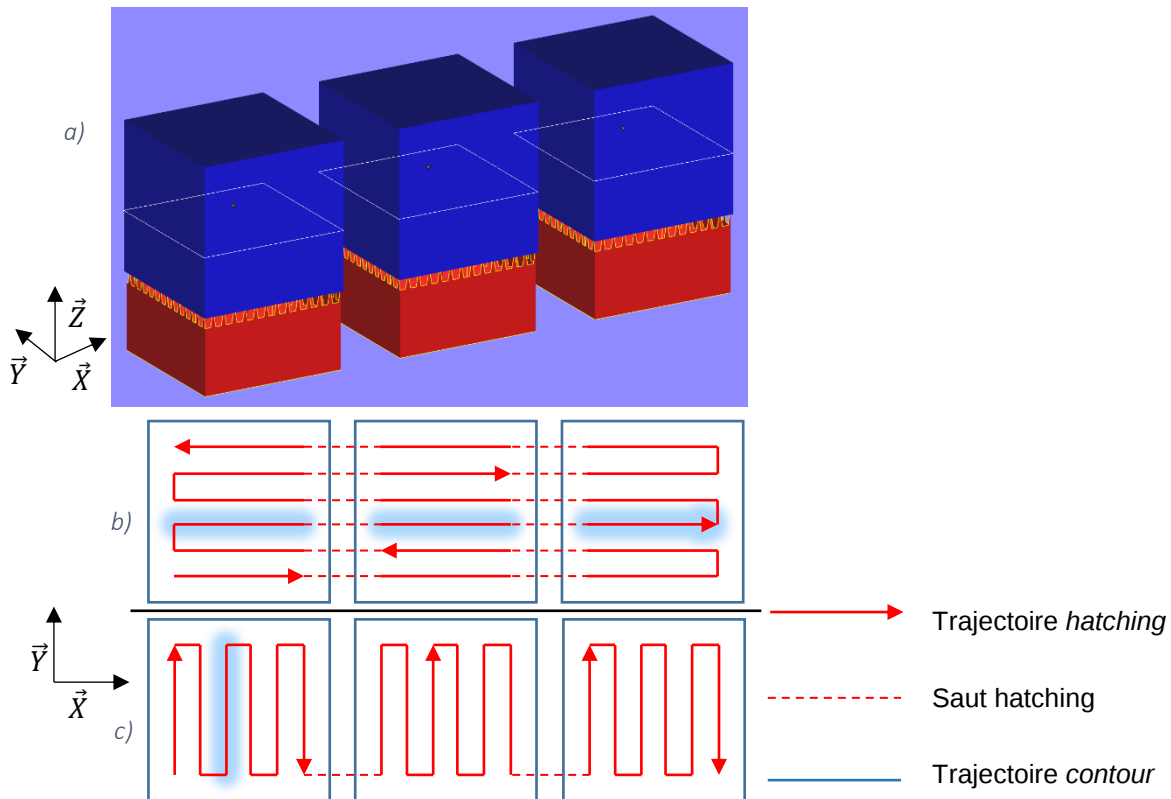


Figure 4.3 : Représentation du chemin du faisceau d'électrons lors de la phase de *hatching* d'un (a) lot de pièces sur (b) une couche paire et (c) une couche impaire.

Dans ces conditions, la phase de *hatching* est la principale source de porosité dans les pièces [Tammas-Williams & al. 2015]. C'est pourquoi cette étude sur la détection de la porosité s'intéresse principalement à cette phase.

4.2.2 La paramétrie de balayage

La paramétrie du faisceau lors de la phase de *hatching* est le premier élément susceptible de créer de la porosité dans la pièce. Généralement, les pores apparaissent lorsque l'énergie apportée à la poudre n'est pas suffisante. Une formulation de cette énergie peut être faite par l'expression de l'énergie volumique transmise à la poudre :

$$(1) E_{vol} = \frac{P_{beam}}{v_{beam} \cdot h \cdot t} \quad (\text{J} \cdot \text{mm}^{-3})$$

où P_{beam} est la puissance du faisceau en W, v_{beam} est la vitesse du faisceau en $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$, h est l'écart entre deux lignes balayées en mm et t est l'épaisseur d'une couche en mm [Tammas-Williams & al. 2015]. Dans le cas de l'EBM Arcam A1, la puissance P_{beam} du faisceau est directement liée au courant i_{beam} du faisceau car la tension est constante (60 kV) :

$$(2) P_{beam} = 6 \cdot 10^4 \cdot i_{beam} \quad (\text{W})$$

Il faut également noter que le courant i_{beam} et la vitesse v_{beam} du faisceau ne sont pas des paramètres accessibles mais sont calculés indépendamment pour chaque ligne à partir de la longueur l de la ligne balayée. Une première fonction permet de déterminer l'intensité i_{beam} en fonction de la longueur l [Everhart & al. 2017] :

$$(3) i_{beam} = f_1(l) \quad (\text{mA})$$

Une seconde fonction permet de déterminer la vitesse de balayage v_{beam} en fonction de l'intensité i_{beam} [Everhart & al. 2017] :

$$(4) v_{beam} = f_2(i_{beam}) \quad (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$$

Avec les équations (2), (3) et (4), l'équation (1) devient :

$$(5) E_{vol} = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot f_1(l)}{f_2(f_1(l)) \cdot h \cdot t} = \frac{6 \cdot 10^4}{h \cdot t} \cdot F(l) \quad (\text{J} \cdot \text{mm}^{-3})$$

avec :

$$(6) F = \frac{f_1}{f_2 \circ f_1}$$

Les fonctions de conversions f_1 et f_2 associées aux équations (3) et (4) suivent une tendance représentée sur la Figure 4.4. La fonction f_2 est susceptible d'avoir des valeurs différentes selon un paramètre choisi par l'utilisateur : la speed-function. Ce paramètre agit sur le coefficient de proportionnalité de la fonction f_2 et n'affecte pas la tendance de la courbe.

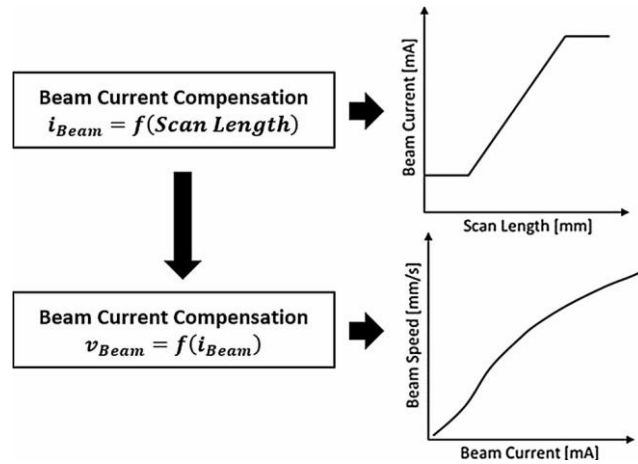


Figure 4.4 Courbes associées aux fonctions f_1 (en haut) et f_2 (en bas) [Everhart & al. 2017]

Finalement, l'équation (5) montre que les paramètres qui influent directement sur l'énergie volumique sont la longueur l des lignes, l'épaisseur t des couches et l'écart h entre les lignes lors du balayage. Dans notre configuration, les couches ont une épaisseur t constante de 50 μm . L'écart h est configuré en début de production et ne change jamais au cours de la production. Seule la longueur l des lignes est un paramètre qui évolue tout au long de la production.

Les fonctions f_1 et f_2 sont construites pour que le temps de fabrication des lignes soit approximativement toujours le même quelle que soit leur longueur. De cette manière, les lignes de fusions ont des historiques thermiques relativement semblables. La courbe associée à la fonction f_1 comporte deux seuils (voir Figure 4.4). Le seuil inférieur correspond à l'intensité requise pour maintenir un faisceau d'électrons stable et le seuil supérieur correspond à la puissance maximale du faisceau d'électrons. Dans les conditions d'utilisation de la machine, les seuils sont atteints à 12 mm et à 96 mm. Au-delà de 96 mm, l'intensité du faisceau d'électrons est constante et la vitesse de balayage n'est pas ralentie pour compenser. L'énergie volumique apportée à la ligne de fusion est alors plus faible et est susceptible de générer de la porosité.

4.3 Méthodes de contrôle des témoins

Dans cette étude, deux stratégies différentes de contrôle sont testées pour les témoins. La première consiste à utiliser le lien qu'il y a entre la porosité interne et la dégradation des surfaces. Et la seconde fait appelle à la tomographie à rayons X.

4.3.1 Contrôle optique

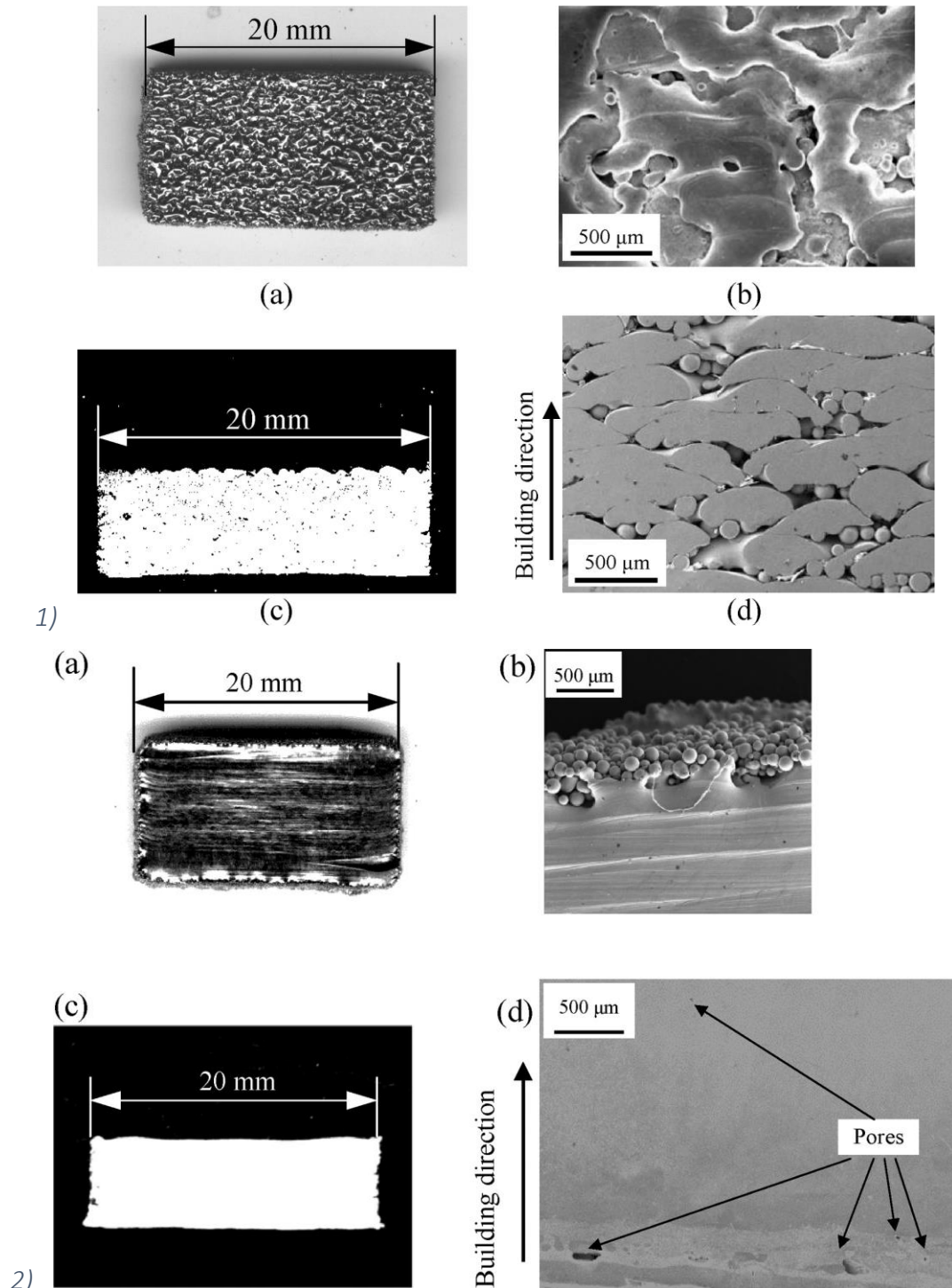


Figure 4.5 Illustration du lien entre porosité interne et état de surface sur une pièce vue du dessus au microscope optique (a), au microscope électronique à balayage (b), vue en coupe latérale au scanner (c) et au microscope électronique à balayage (d) pour une pièce défectueuse (1) et une pièce valide (2) [Guo & al. 2015]

Le contrôle optique s'appuie sur une observation faite dans la littérature et expérimentalement confirmée : la présence de pores ainsi que la dégradation de l'état de surface sont générées par de mauvaises conditions de fusion. La qualité de l'état de surface d'une pièce est alors un indicateur des conditions de fusion de la pièce. L'idée de cette première méthode de contrôle est d'utiliser l'état de surface pour qualifier les conditions de fusion et permettre la détection de pores plans.

Cette dégradation de l'état de surface se manifeste par un relief accentué au niveau des surfaces supérieures d'une pièce (surface dont la normale est orientée selon la direction de fabrication $\vec{Z}$). Le lien entre porosité et dégradation de l'état de surface est parfaitement illustré dans l'étude de Guo & al. portant sur les effets des paramètres de balayage sur la fabrication par EBM [Guo & al. 2015]. Ce lien est illustré sur les images de la Figure 4.5.

Dans cette approche, la méthode de contrôle du témoin est optique. Le contrôle est constitué de deux étapes : une première visuelle et une seconde avec un microscope optique.

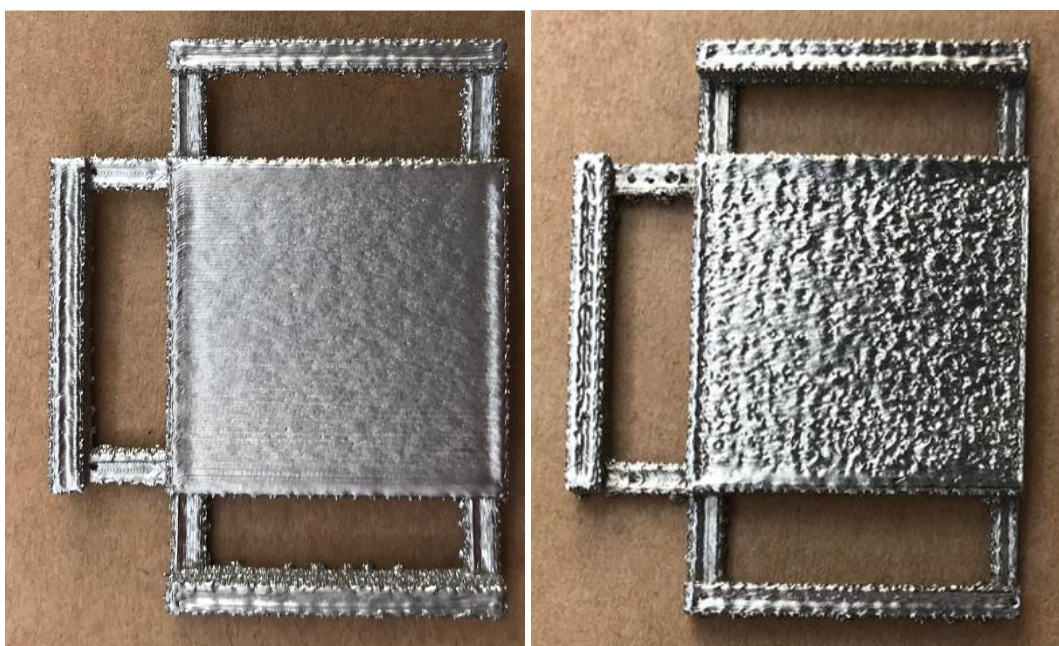


Figure 4.6 Photos de surface supérieure normale (gauche) et dégradée (droite)

Le premier contrôle visuel présente l'avantage d'être rapide et ne requiert aucun matériel. Il consiste simplement à observer la surface supérieure du témoin et regarder si les signatures d'un manque de fusion sont présentes (i.e. relief très accentué, pas de marque du sens de passage du faisceau). Ce premier contrôle permet de faire un premier tri et permet d'éviter une analyse poussée lorsque ce n'est pas nécessaire. La Figure 4.6 illustre les différents états de surface qu'il est possible d'obtenir sur les témoins. Ainsi, lorsque le témoin présente un état de surface tel que celui de droite sur la figure, la pièce est trop poreuse.

La seconde phase du contrôle se fait avec un microscope optique numérique et une source de lumière orientable. Dans le cas de l'étude, un MicroVu est utilisé pour cette opération de contrôle. Le témoin est positionné sur la table de mesure du MicroVu et l'éclairage de l'optique est paramétré pour être le plus rasant possible sur la surface. De cette façon, les reliefs sont plus prononcés. Les images alors captées permettent d'observer si l'état de surface montre ou non une dégradation (voir Figure 4.7). Lorsqu'une pièce est fabriquée dans des conditions normales de fabrication, les seuls reliefs qui apparaissent à la surface de la pièce sont laissés par le passage de la piscine de fusion et ils laissent des ombres rectilignes. En revanche, lorsque les conditions sont mauvaises, certains grains de poudre ne sont pas correctement fondus et laissent une empreinte à la surface de la pièce.

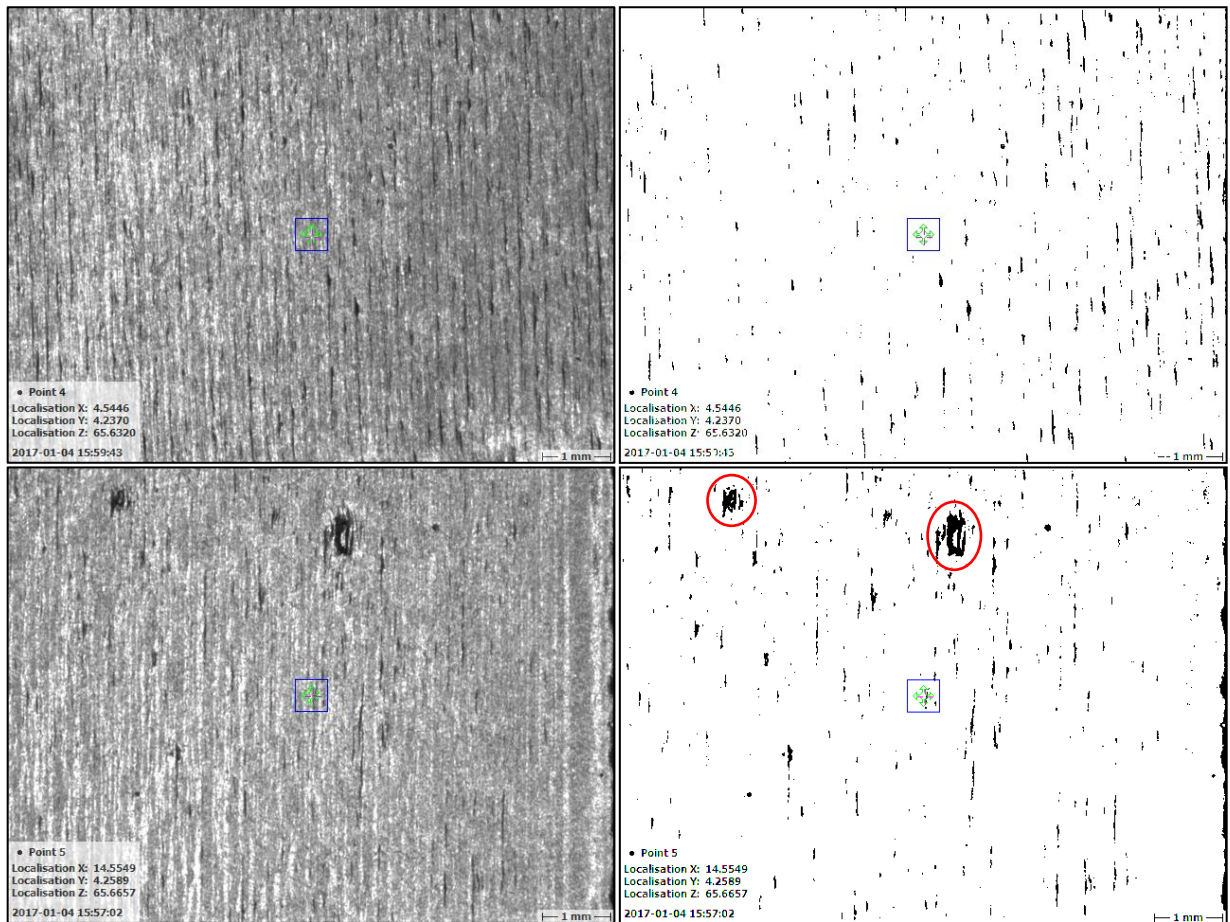


Figure 4.7 Photo de la surface d'un témoin valide (haut) et défectueux (bas)
vue au MicroVu avant (gauche) et après seuillage (droite).

Les ombres sont alors plus prononcées et ont des formes non rectilignes. Avec un seuillage des niveaux de gris de l'image, il est possible de mettre facilement en évidence les ombres laissées par le relief et la lumière rasante. Les deux configurations sont présentées sur la Figure 4.7 avec les exemples de défauts de surface encerclés en rouge.

A l'aide de ces deux phases, cette méthode de contrôle permet de mettre en évidence la dégradation de l'état de surface causée par de mauvaises conditions de fusion. En comparaison des méthodes classiques de contrôle de porosité, cette approche répond aux besoins de rapidité et de coût. Les frais engendrés par la première phase de contrôle sont ceux de la matière et du temps de préparation associés au témoin. La seconde phase a été réalisée avec un MicroVu, mais un appareil photo adapté à la macrophotographie ainsi qu'une source de lumière orientée offrent des résultats comparables. En comparaison à un tomographe, ce matériel constitue un investissement relativement faible.

4.3.2 Contrôle tomographique

Dans la seconde approche, le témoin est contrôlé par tomographie. Cette solution de contrôle est susceptible d'être plus chère que le contrôle optique. En effet, la tomographie à rayons X est une technologie qui coûte cher par ses équipements, par sa consommation énergétique et par la main d'œuvre qualifiée dont elle a besoin. Pour limiter le coût du contrôle, la tomographie est réalisée en 30 minutes (1 heure en comptant le temps d'installation du témoin et de paramétrage du tomographe). En utilisant un tomographe EASYTOM XL 150, il est possible d'obtenir des résultats satisfaisants pour un cube de 2 mm de côté. La tomographie et la méthode de mesure de la porosité proposée permettent de mesurer la porosité du témoin avec une résolution de 0,01 %.

4.4 Approche par contrôle optique

Dans cette approche, la surface du témoin est l'élément indicateur de mauvaises conditions de fusion. L'objectif des méthodes proposées est de déterminer la logique à suivre pour positionner et fabriquer le témoin pour qu'il soit représentatif des pires conditions de fabrication de la pièce.

4.4.1 Méthode

4.4.1.1 Insertion

Sur une pièce ou un lot de pièces, les pires conditions de fusion se situent généralement sur les lignes les plus longues. Pour copier les conditions de fusion de la pièce sur l'élément témoin, ce dernier doit être aligné avec la pièce ou le lot dans la direction de ces lignes de fusion. Dans le cas de l'EBM, et plus précisément avec la machine Arcam A1 pilotée par EBM Control 3.2, les lignes de fusion sont orientées en alternance selon les axes $\vec{X}$ ou $\vec{Y}$ de la machine. Dans cette étude et pour simplifier les explications, nous nous plaçons toujours dans le cas où les lignes de fusion critiques sont orientées selon l'axe $\vec{X}$.

Dans un premier temps, il faut positionner le témoin dans la prolongation des lignes de fusion. Sa position dans le plan de fabrication est donc déterminée par la position des lignes de fusion critiques. Plus il couvre de lignes de fusion critiques et plus les signatures de mauvaises conditions de fusion sont visibles à sa surface. Dans l'exemple de la Figure 4.8, le témoin est placé de façon à couvrir toutes les lignes de fusion de la pièce.

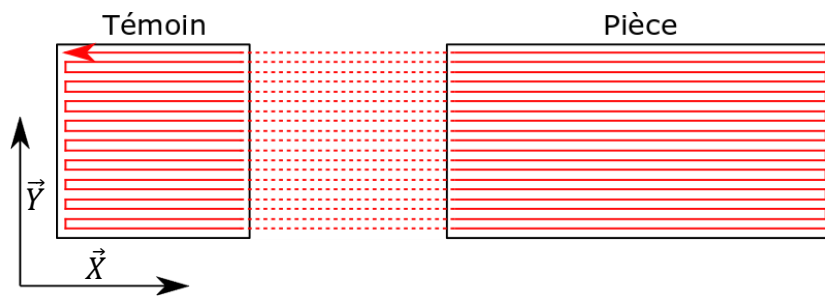


Figure 4.8 Schématisation du passage du faisceau d'électrons

La position du témoin selon l'axe $\vec{Z}$ est déterminée par la hauteur des lignes de fusion. Pour être représentative, la surface du témoin doit être balayée dans la direction de l'axe $\vec{X}$. La surface du témoin doit donc se trouver sur une couche paire (couche dont la hauteur par rapport à la plateforme est un multiple de 100 μm , voir 2.1.2 Procédé EBM).

4.4.1.2 Conception

Pour remplir sa fonction, le témoin doit comporter une surface plane qui est fabriquée sur une seule couche. Il s'agit de la surface marquée en bleu sur la Figure 4.9. Cette surface est la surface supérieure du témoin, celle qui est analysée par contrôle optique. C'est cette même surface qui doit être alignée avec les lignes de fusion critiques. Une partie de ses dimensions est déterminée par les dimensions de la pièce ou du lot de pièces que le témoin va contrôler. Les dimensions selon les axes $\vec{X}$ et $\vec{Y}$ sont cependant restreintes à un minimum de 12 mm de côté, car en dessous de 12 mm, il y a un risque d'apporter trop d'énergie et donc d'altérer l'information [Everhart & al. 2017]. Il faut également que la surface du témoin soit suffisamment importante pour que les défauts soient visibles. Pour s'affranchir de la limite inférieure et avoir une surface d'observation confortable, les dimensions pendant l'étude sont de 20 mm minimum pour chaque côté de la surface. 20 mm constituent cependant une augmentation importante des longueurs de lignes de fusion préjudiciables aux conditions de fusion.

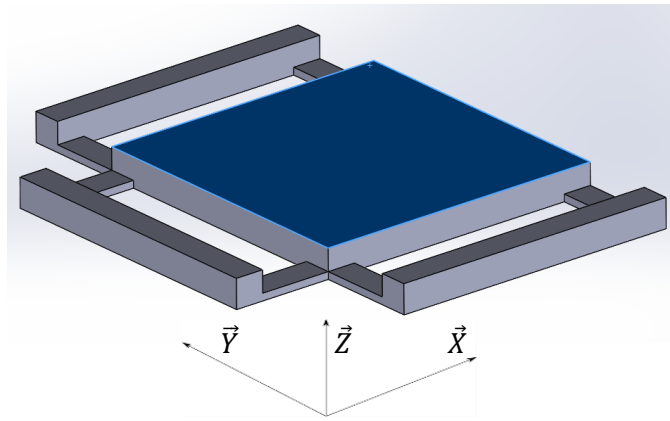


Figure 4.9 Géométrie générale du témoin pour le contrôle optique

Lors de son passage, le faisceau d'électrons parcourt les pièces et le témoin. En fin de ligne, le faisceau n'est pas interrompu et le passage d'une ligne à l'autre se fait avec de l'énergie. Lors de ce retournement, le faisceau parcourt la distance qui sépare les deux lignes de fusion avec les mêmes paramètres que lors du balayage. Ce retournement du faisceau peut engendrer un excédent d'énergie et donc des défauts géométriques sur la surface [Béraud, 2016]. Trois entités sont ajoutées autour de la surface pour éloigner les zones de retournement du faisceau d'électrons de la surface supérieure (voir Figure 4.10). Grâce à cela, les conditions de fabrication de la surface supérieure sont davantage semblables à celles présentes au cœur de la pièce contrôlée et les déformations liées au retournement du faisceau ne risquent plus d'altérer la surface du témoin.

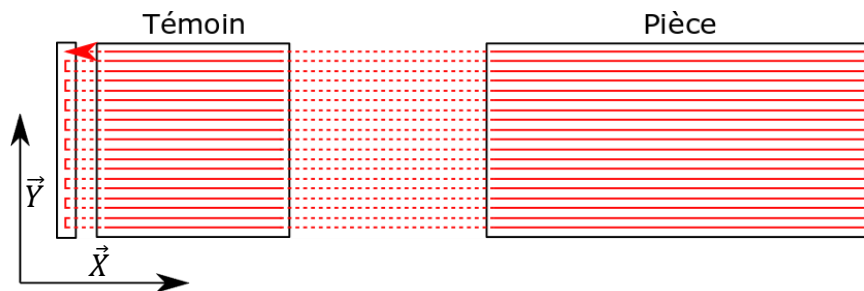


Figure 4.10 Schématisation du passage du faisceau d'électrons avec l'ajout de la zone de retournement

L'épaisseur du témoin doit être supérieure à 0,5 mm pour s'assurer que la couche supérieure soit fabriquée dans des conditions stables et qu'elle ne présente pas les défauts propres aux premières couches surplombantes [Dinwiddie & al. 2013]. Nous avons choisi une épaisseur de 2 mm pour être sûr de fabriquer la surface dans des conditions de fabrication stables.

Plusieurs paramètres sont dépendants de la pièce ou du lot de pièces à contrôler. Sur la Figure 4.11, le lot de pièces (en gris) à contrôler est pris pour exemple. Sur ce lot, certaines lignes de fusion (en rouge) sont longues et peuvent constituer un risque. Le témoin est donc placé dans l'alignement de ces lignes de fusion. Il est placé à la même distance du centre que le point le plus excentré du lot de pièces. De cette manière, il comportera au minimum les mêmes risques d'être affecté par l'hétérogénéité de l'espace de fabrication que le lot. Ensuite, la dimension du témoin selon l'axe $\vec{Y}$ est ajustée par rapport au lot de fabrication pour que les conditions de fusion du témoin et des pièces selon cet axe soient semblables d'une couche à l'autre. La Figure 4.11 présente une application de ces règles à un cas simple.

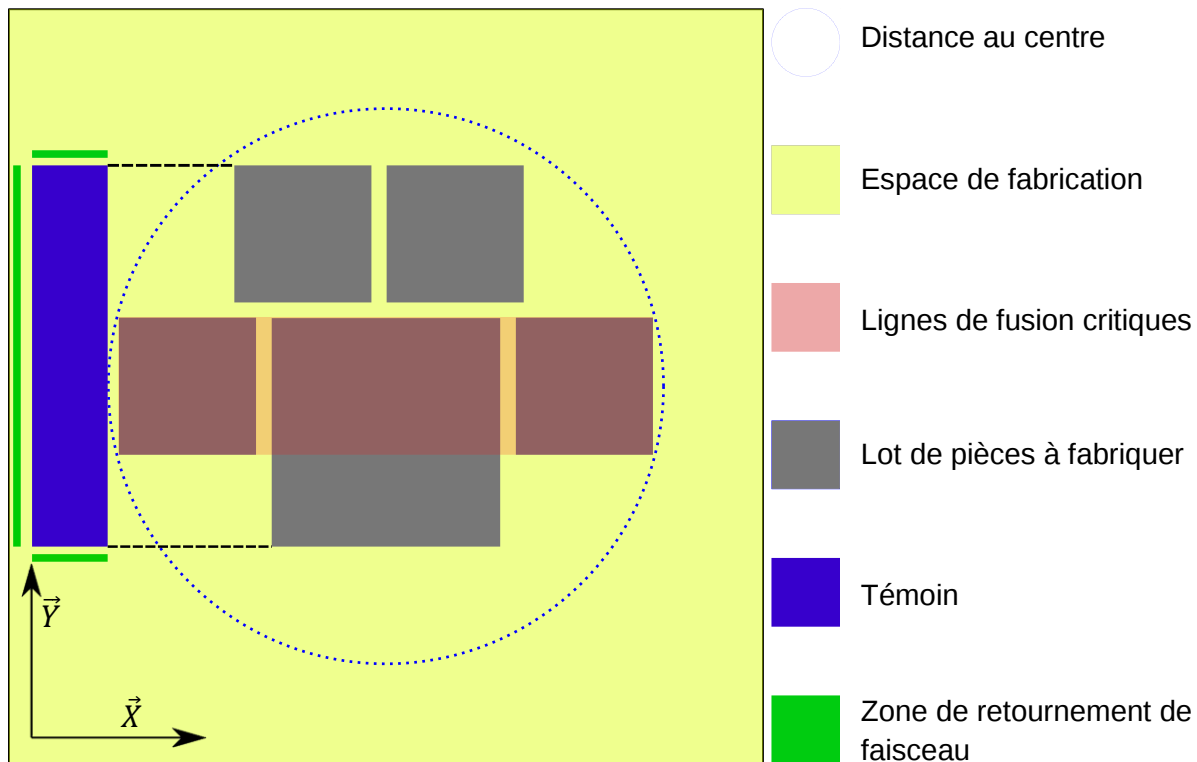


Figure 4.11 Organisation d'un lot de fabrication et insertion du témoin optique

Dans cette configuration, la partie du témoin représentative des pires conditions de fusion se situe dans le prolongement des lignes de fusion critiques (en rouge sur la Figure 4.11). Le contrôle de cette partie est pertinent car c'est là que les défauts présentent le plus de risques d'apparaître. Cependant, l'intégralité de la surface doit être exempte de défaut pour que le témoin soit valide, il est alors possible de contrôler la surface toute entière.

4.4.1.3 Stratégie de fabrication

Ce témoin est fabriqué avec les mêmes paramètres que le reste du lot de fabrication. Lors de la préparation de la production, il faut donc l'inclure au lot de production. Dans le cas où plusieurs lots sont fabriqués en parallèle, il faut fabriquer le témoin avec le lot contenant les pièces à contrôler.

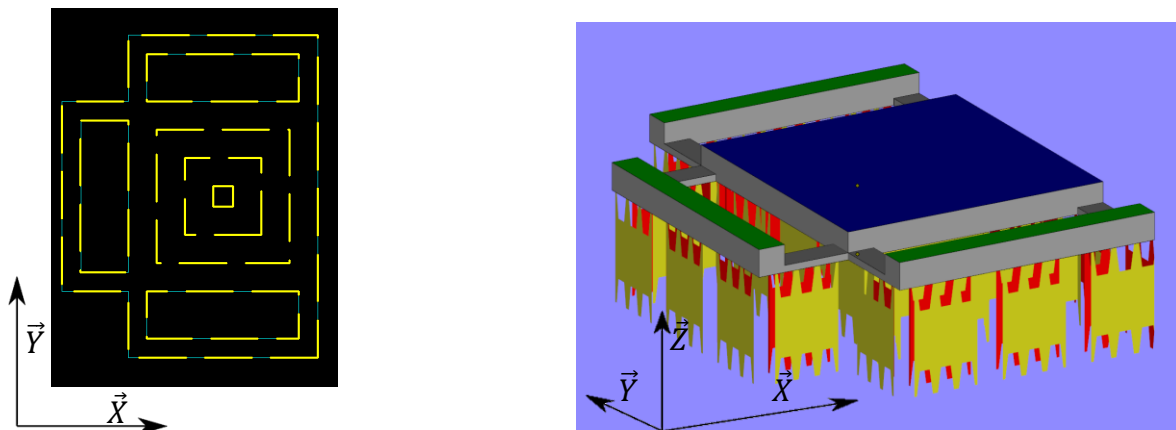


Figure 4.12 Stratégie de supportage du témoin vue de dessous (gauche) et en perspective (droite)

Pour que le témoin soit correctement fabriqué et ne présente pas de risque de faire échouer la production, il est fabriqué avec des supports. La stratégie de support choisie est composée de contours concentriques espacés de 3 mm, longs de 8 mm. Cette stratégie permet d'absorber les défauts générés par les conditions de

fabrication hétérogènes de l'espace de fabrication [Piaget & al. 2017]. Les supports sont également fragmentés à intervalles réguliers pour faciliter leur enlèvement après la fabrication.

4.4.2 Expérimentation

4.4.2.1 Campagne expérimentale

La campagne expérimentale va permettre de vérifier que la présence de défauts à la surface du témoin est corrélée avec celle de pores dans la pièce. Le paramètre du plan d'expérience sélectionné est l'énergie volumique apportée aux lignes de fusion. Comme il a été vu dans l'analyse du procédé, la longueur des lignes de fusion impacte directement l'énergie volumique. Comme au-delà de 96 mm de longueur balayée, l'énergie n'est plus correctement distribuée à la poudre, ce paramètre est idéal pour générer de la porosité de manière contrôlée.

Pour l'expérimentation, la pièce testée est un parallélépipède rectangle. Il est dimensionné à 3 mm de hauteur, 20 mm de largeur (pour ne pas être en dessous du seuil inférieur de la fonction f_1) et sa longueur est le paramètre que nous faisons varier. Le témoin et la pièce sont fabriqués dans la position représentée sur la Figure 4.13. Dans cette configuration, la surface du témoin est positionnée pour contrôler la 40^{ème} couche de la pièce (2 mm en hauteur). La stratégie de supportage du témoin est également appliquée à la pièce.

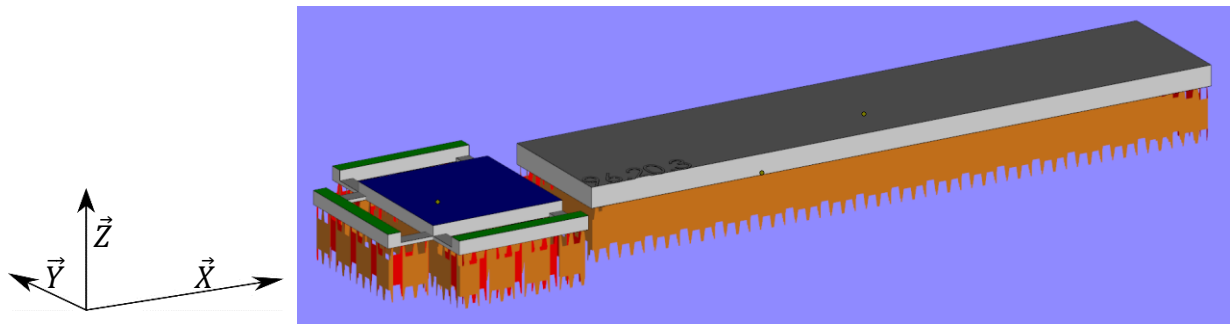


Figure 4.13 Représentation de la pièce test, du témoin et de la stratégie de support tels qu'ils sont fabriqués pour la campagne expérimentale

Le témoin est contrôlé selon la méthode de contrôle proposée dans la partie 4.3.1. Cette méthode permet de détecter la détérioration de la surface supérieure du témoin. Afin de comparer cette détérioration avec l'apparition de porosité dans la pièce, cette dernière est analysée par tomographie à rayons X. Pour rendre le contrôle de la pièce plus rapide et plus accessible, seule une partie de la pièce est contrôlée. Ainsi, des carottages sont réalisés par électroérosion au cœur de la pièce. L'électroérosion est un procédé d'usinage n'appliquant aucun effort de coupe sur la pièce, ainsi les échantillons sont préservés de toute déformation plastique. Puis les carottes sont ensuite tomographiées. Cette technologie est sélectionnée car elle offre davantage de chances d'observer un pore qu'avec des opérations de découpe et polissage du témoin. De plus, certains procédés de découpe favorisent la fermeture des pores à l'endroit de la découpe.

La campagne expérimentale est réalisée en deux temps : une première phase est consacrée à observer les impacts liés à la longueur des lignes balayées sur une plage de valeur très étendue. Cela permet de voir comment se comporte la surface du témoin en conditions normales (entre 12 et 96 mm) et en conditions dégradées (> 96 mm). Cela permet aussi de cibler la plage de longueurs de ligne pour laquelle les défauts apparaissent sur la surface du témoin et à l'intérieur de la pièce. La seconde phase a pour objectif de déterminer avec une plus grande précision les plages d'apparition en affinant les résultats obtenus dans la première partie.

Pour la première phase, les longueurs de lignes de fusion testées sont 96, 106, 116, 130 et 160 mm. D'après les données de la machine, à 96 mm la pièce et le témoin sont fabriqués dans des conditions normales

et chaque valeur au-delà présente une dégradation des conditions. 160 mm représente donc les pires conditions de la première phase.

Les tests effectués lors de la première phase de la campagne expérimentale vont permettre de déterminer les plages d'apparition des défauts. Ces plages sont affinées lors de la seconde phase avec un écart de 2 mm entre chaque essai. Selon les résultats obtenus, la seconde phase de l'expérimentation est répétée pour valider la répétabilité des longueurs d'apparition des défauts.

4.4.2.2 Résultats

Les résultats de la première phase sont inscrits dans le Tableau 4.1. L'état de surface est visiblement dégradé sur toutes les pièces à partir de 116 mm de longueur balayée. Les pores plans sont visibles en tomographie à partir de 106 mm. Les défauts de porosité et d'état de surface apparaissent respectivement sur les intervalles [96 ; 106] et [106 ; 116]. En conséquence de ces résultats, pour la seconde phase les valeurs testées vont de 96 à 116 mm.

Tableau 4.1 Résultats de la première phase de la campagne expérimentale

Longueur totale (mm)	Etat de surface du témoin	Pores internes dans la pièce
160	Dégradé	Présents
130	Dégradé	Présents
116	Dégradé	Présents
106	Normal	Présents
96	Normal	Absents

Conformément aux résultats obtenus lors de la première phase, les défauts n'apparaissent pas simultanément dans la pièce et à la surface du témoin. Les conditions de fusions dégradées n'affectent pas encore la surface du témoin à 106 mm alors que la santé matière est déjà affectée. Les résultats de la seconde phase sont détaillés dans le Tableau 4.2.

Tableau 4.2 Résultats de la seconde phase de la campagne expérimentale

Longueur totale (mm)	Etat de surface du témoin	Pores internes dans la pièce
116	Dégradé	Présents
114	Normal/Dégradé	Présents
112	Normal	Présents
110	Normal	Présents
108	Normal	Présents
106	Normal	Présents
104	Normal	Absents
102	Normal	Absents
100	Normal	Absents
98	Normal	Absents
96	Normal	Absents

La seconde phase de la campagne expérimentale montre que les pores se forment à partir de 106 mm de longueur de ligne de fusion. Sur plusieurs répétitions de la seconde phase, à la longueur 114 mm, le témoin

ne présente pas à chaque fois un défaut à sa surface : pour quatre itérations, le témoin n'a présenté de défaut qu'à une reprise.

4.4.2.3 Critiques et analyses

L'approche proposée et les résultats de la campagne expérimentale montrent quelques limites. D'abord, il faut noter que l'objectif de détection de la formation des pores n'est pas atteint. En effet, les témoins ne présentent aucun défaut pour les longueurs 106, 108, 110 et 112 mm alors que les pièces associées sont toujours poreuses. Même à 114 mm, l'apparition du défaut visuel n'est pas systématique, elle ne devient stable qu'à partir de 116 mm.

A 116 mm, lorsque les conditions de fusion affectent visiblement la surface du témoin, la porosité dans la pièce est déjà largement supérieure au taux normalement obtenu avec les pores sphériques. La tomographie des pièces fabriquées à cette longueur révèle des taux allant jusqu'à 0,4 % de pores. Ainsi, les expériences montrent que le défaut est toujours visible sur le témoin à partir de 116 mm, et la porosité des pièces n'excède pas 0,4 % à cette longueur. Dans ces conditions, si le témoin ne présente pas de défaut, alors la porosité n'excède pas 0,4 %.

Dans cette campagne expérimentale, les mauvaises conditions de fusion ne laissent pas de défauts visibles sur les témoins entre les longueurs 106 et 112 mm. Cependant, la tomographie montre que ces mêmes témoins contiennent des pores plans. En prélevant des échantillons de taille réduite dans les témoins, la tomographie montre que leur porosité s'approche de celle de la pièce.

La tomographie des pièces et des témoins montre aussi que, sur des échantillons poreux, certaines couches ne contiennent aucun pore. Ainsi, le contrôle sur une seule couche présente des risques de ne pas être intégralement représentatif de la porosité d'un volume.

4.4.3 Conclusion

Dans cette première partie, une méthode proposée pour la détection de porosité est étudiée. En utilisant les stratégies de fabrication de la technologie EBM, les conditions de fabrication d'une pièce ou d'un lot de pièces sont reproduites sur un élément témoin. La conception ainsi que les stratégies d'insertion et de fabrication permettent de copier les défauts du lot contrôlé sur le témoin.

Le témoin, lorsqu'il est fabriqué dans de mauvaises conditions de fabrication, peut présenter un état de surface dégradé. Une méthode de contrôle du témoin permet de détecter cette dégradation. En revanche, les apparitions de défaut au niveau de la surface et de pores dans la matière ne semblent pas se faire aux mêmes conditions de fabrication. En effet, il s'avère que même lorsque le témoin est visiblement intact, les pièces contrôlées peuvent déjà contenir jusqu'à 0,4 % de porosité. Cette approche et les méthodes utilisées ne sont donc pas adaptées à la détection de formation de pores plans.

De plus, la géométrie imposante du témoin (comparée à l'espace de fabrication) a pour effet d'agrandir les lignes de fusion, créant un plus grand risque de créer de la porosité, ainsi que de réduire l'espace de fabrication disponible.

Finalement, cette première méthode se révèle intéressante seulement si 0,4 % de porosité est un taux acceptable pour la pièce. Elle présente également l'avantage d'être simple à mettre en œuvre et bon marché.

Dans la suite des analyses, il est apparu que les témoins qui ne présentaient pas de défauts alors que les pièces étaient poreuses comportaient tout de même des pores plans. Le défaut n'est donc pas visible à la surface mais il est présent au cœur de la pièce. Ce résultat d'analyse a donc logiquement mené à la seconde approche : l'approche par contrôle tomographique.

4.5 Approche par contrôle tomographique

Cette approche est semblable en plusieurs points à l'approche précédente à la différence que le témoin est contrôlé par tomographie. Cette différence de méthode de contrôle implique d'autres modifications dans les méthodes d'insertion, la conception et les stratégies de fabrication.

4.5.1 Méthode

4.5.1.1 Insertion

La stratégie d'insertion du témoin est semblable à l'approche proposée précédemment sur plusieurs points. Le témoin est positionné dans le prolongement des lignes de fusion identifiées comme critiques. Sa position sur l'axe $\vec{X}$ est ajustée pour que le témoin soit aussi loin du centre que chaque pièce du lot. De cette manière, les risques d'apparition d'un défaut généré par l'hétérogénéité de l'espace de fabrication sont plus grands dans le témoin que dans le lot de pièces.

En revanche, le positionnement en hauteur est différent dans cette approche. En effet, la méthode de contrôle permet d'analyser le témoin dans son volume. Il peut donc être associé à des lignes de fusion critiques sur plusieurs couches. Il y a alors plusieurs configurations possibles : soit les lignes de fusions les plus grandes ne sont présentes que sur une couche, soit elles sont répétées sur plusieurs couches. Ces deux configurations sont illustrées sur la Figure 4.14. Dans la première configuration (à gauche), le positionnement en hauteur du témoin est fait pour avoir la ligne critique au cœur du témoin. Dans la seconde configuration (à droite), le témoin est positionné pour couvrir un maximum de lignes critiques.

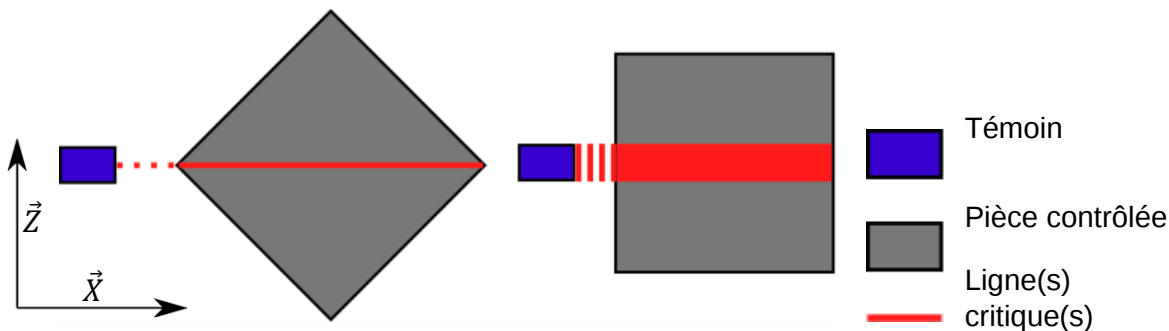


Figure 4.14 Illustration du positionnement en hauteur du témoin par rapport à la géométrie des pièces à contrôler

Juste après le témoin et toujours dans l'alignement des lignes de fusion critiques, un second élément est ajouté. Cet élément (en vert sur la Figure 4.15) permet d'écarter les conditions de fusion du témoin lors du retournement de faisceau. Avec l'ajout de cet élément, les conditions de fusion sur le témoin sont homogènes sur tout son volume et elles sont représentatives des conditions de fusion au cœur des pièces fabriquées. Dans l'approche précédente, deux autres éléments sont ajoutés pour éloigner les retournements du faisceau selon l'axe $\vec{Y}$. Ici, compte tenu de la géométrie du témoin, ces retournements sont négligés.

Une fois le témoin et son annexe insérés, ils sont dimensionnés en longueur pour couvrir l'intégralité des lignes de fusion du lot contrôlé sur l'axe $\vec{X}$ comme cela est illustré sur la Figure 4.15.

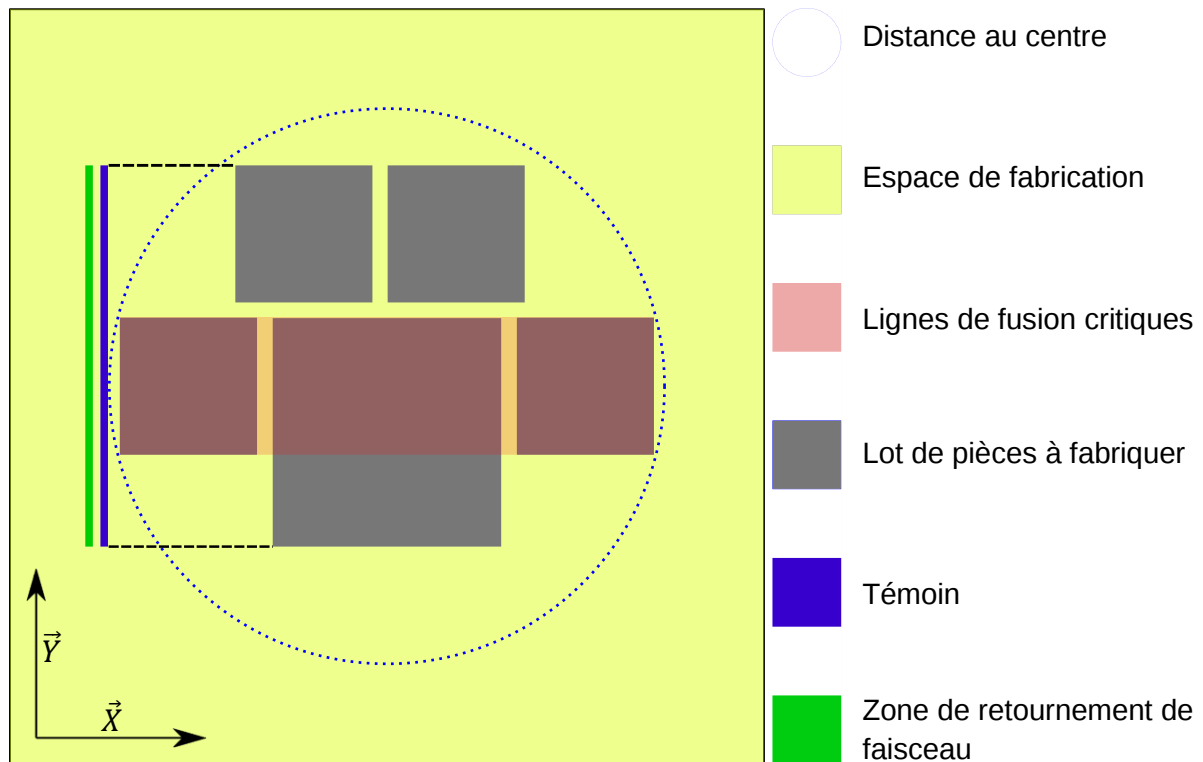


Figure 4.15 Organisation d'un lot de fabrication et insertion du témoin tomographique

Une fois le témoin fabriqué, seule la partie du témoin correspondant aux lignes critiques est analysée. Dans la configuration présentée sur la Figure 4.15, il s'agit de la partie du témoin qui se situe en prolongement de la zone rouge. Pour repérer cette section, il est possible d'ajouter à la géométrie du témoin des marqueurs délimitant la zone ciblée. Cette opération doit être faite une fois l'organisation du lot établie, elle peut alors être réalisée avec Magics ou tout autre logiciel de préparation adapté.

4.5.1.2 Conception

Le témoin est conçu pour satisfaire les conditions de tomographie explicitées dans la méthode de contrôle. Pour satisfaire ces conditions, il doit être inclus dans un parallélépipède rectangle dont la section carrée fait 2 mm de côté. Les contraintes dimensionnelles selon l'axe $\vec{Y}$ sont définies par l'espace disponible dans le tomographe, or dans le cas de l'étude, c'est l'espace de fabrication de l'Arcam A1 qui est le plus contraignant. Cette dimension n'est donc pas contrainte, elle est définie pour couvrir l'intégralité des lignes de fusion du lot contrôlé sur l'axe $\vec{X}$ comme explicité sur la Figure 4.15.

L'annexe du témoin a les mêmes dimensions que le témoin à l'exception de sa dimension selon l'axe $\vec{X}$. La fonction de l'annexe est que le retournement du faisceau se fasse hors du témoin (comme pour l'approche précédente, voir Figure 4.10). Pour ce faire, il faut que pour chaque ligne de fusion, une partie de l'annexe soit en partie fabriquée avec la stratégie *hatching*. Sachant que la périphérie des pièces est fabriquée par contour sur une largeur de 0,54 mm, cette dimension de l'annexe doit nécessairement faire plus du double de cette largeur. En lui donnant une dimension de 1,5 mm de largeur, la première contrainte est satisfaite ($1,5 > 2 \times 0,54$). Une portion de 0,42 mm est ainsi fabriquée par *hatching* ($1,5 - 2 \times 0,54$). Les dimensions de l'annexe du témoin sont de 1,5 mm selon l'axe $\vec{X}$, 2 mm de selon l'axe $\vec{Z}$ et la dimension selon l'axe $\vec{Y}$ est définie par le lot de pièces contrôlées.

4.5.1.3 Stratégie de fabrication

Avec les thèmes de fabrication proposés par EBM Control 3.2, les pièces sont fabriquées avec deux stratégies de fusion différentes : *contour* et *hatching*. L'objectif du témoin est de caractériser les conditions de fusion du *hatching*. Or, dans des conditions classiques, le témoin serait fabriqué en grande partie par la stratégie *contour*. Pour pallier ce point, une stratégie de fabrication différente est proposée. La production est séparée en deux lots distincts : un premier ne contenant que le lot de pièces à produire et un second contenant le lot de pièces et le témoin (avec son annexe pour le retournement du faisceau). Dans le premier lot, le contour est activé mais le hatching est désactivé. Pour le second, les activations sont inversées. Ainsi, la production se déroulera dans l'ordre suivant :

1. Descente du plateau
2. Ajout de la poudre par ratissage : *rake*
3. Consolidation de la poudre : *preheat*
4. Fusion des pièces du lot 1 : *melt1* (lot de pièces)
 - a. Fusion des contours : *contour1* (lot de pièces)
 - b. Fusion des parties internes : *hatching1*
5. Fusion des pièces du lot 2 : *melt2* (lot de pièces et témoin)
 - a. Fusion des contours : *contour2*
 - b. Fusion des parties internes : *hatching2* (lot de pièces et témoin)
6. Fusion des supports : *wafer*

De cette manière, le lot de pièces est fabriqué dans les mêmes conditions et dans le même ordre que s'il était réalisé en un seul lot et le témoin n'est pas fabriqué avec la stratégie *contour*. Cela permet alors au témoin d'être intégralement représentatif des conditions de fusion de la stratégie de *hatching*.

La fabrication sans contour du témoin tel qu'il est dimensionné a pour effet de produire un témoin plus petit que prévu. En effet, comme illustré sur la Figure 4.16, désactiver le *contour* n'active pas le *hatching* sur la partie de la géométrie qui normalement est fabriquée en *contour*. Ainsi, pour obtenir la géométrie souhaitée (parallélépipède rectangle de section carrée de 2 mm), il faut prendre en compte l'absence des contours. Le témoin est donc redimensionné dans sa largeur en ajoutant 1,08 mm (2 fois 0,54 mm). De cette manière, le témoin conçu fait 2 mm d'épaisseur et 3,08 mm de largeur. Et le témoin fabriqué fait bien 2 mm de largeur.

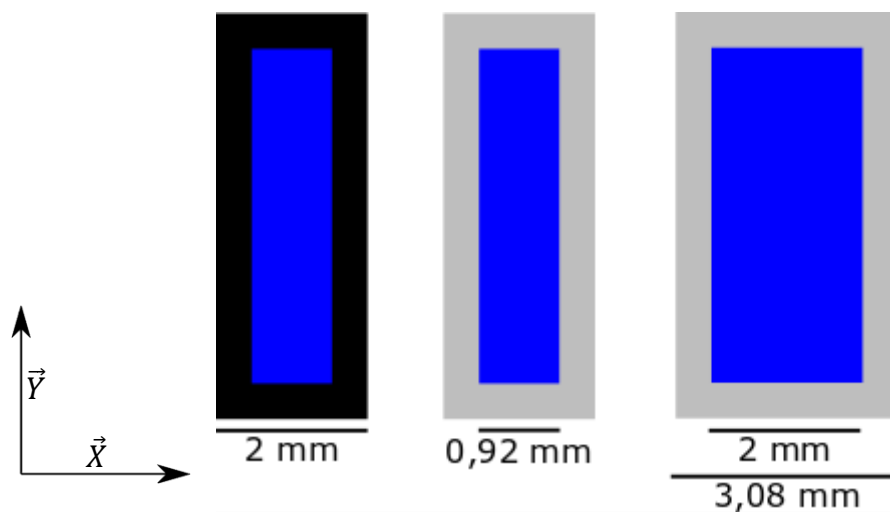


Figure 4.16 Répartition des parties fabriquées en contour (noir) et en hatching (bleu) pour le témoin fabriqué normalement (gauche), fabriqué sans contour (centre) et redimensionné (droite)

La stratégie de supportage reste identique à l'approche précédente où elle a déjà montré des résultats satisfaisants. Il s'agit donc de contours concentriques espacés de 3 mm, longs de 8 mm et segmentés tous les 5 mm par un espacement de 2 mm.

En revanche, pour cette version du témoin, la stratégie de supportage est décalée du contour de la surface supportée (cela est visible sur la Figure 4.17). En effet, à cette étape de préparation, la pièce intègre encore le contour qui n'est pas fabriqué. Si les supports sont trop proches du contour, ils ne sont pas en contact avec la surface fabriquée. Un décalage est donc appliqué à la stratégie de supportage, ce décalage est égal à la largeur du contour fabriqué par la stratégie *contour*.

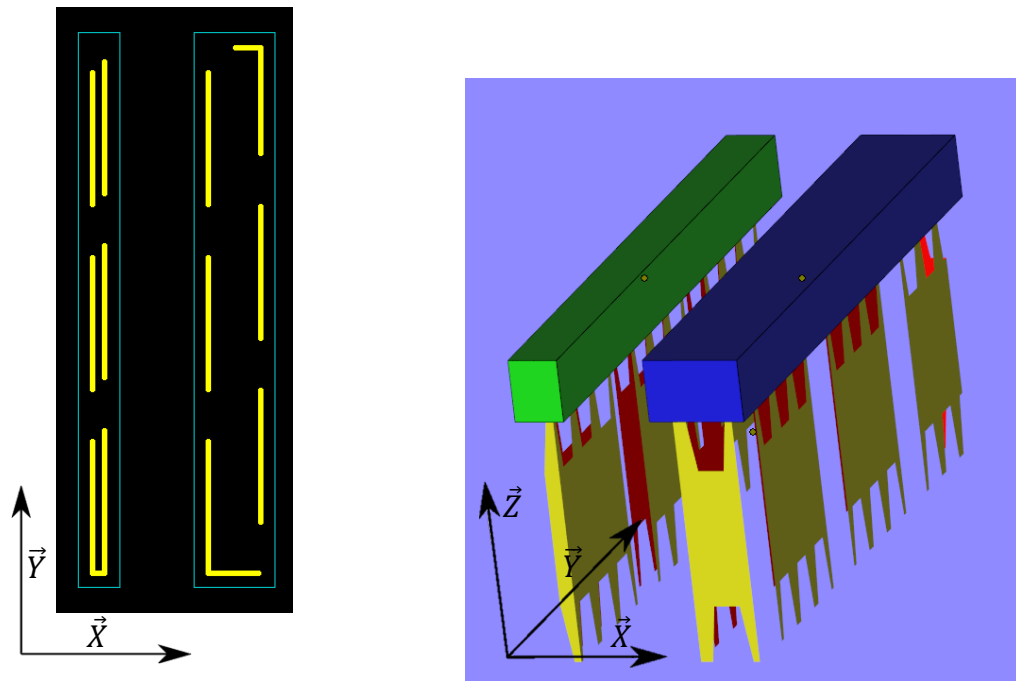


Figure 4.17 Stratégie de supportage du témoin vue de dessous (gauche) et en perspective (droite)

4.5.2 Expérimentation

Comme dans l'approche précédente, l'expérimentation utilise la longueur de ligne comme paramètre d'expérimentation. En utilisant le principe qu'au-delà de 96 mm le logiciel ne pilote plus correctement l'énergie apportée à une ligne de fusion, différentes longueurs au-delà de cette limite sont testées. L'agencement de la pièce test de longueur variable, du témoin et de l'annexe du témoin est représenté sur la Figure 4.18. La stratégie de support est également représentée.

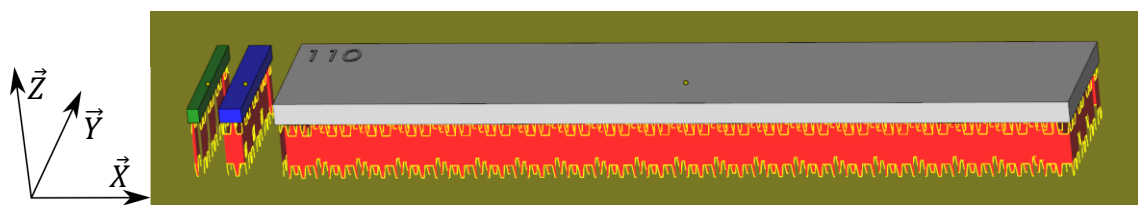


Figure 4.18 Visualisation de la pièce test, du témoin, de son annexe et de la stratégie de support tels qu'ils seront fabriqués pour la campagne expérimentale

La pièce et le témoin sont ensuite contrôlés par tomographie. Pour cela, des échantillons ayant les mêmes proportions que le témoin sont prélevés dans la pièce par électroérosion. Ces échantillons et le témoin sont ensuite tomographiés et leur porosité respective est extraite. Les valeurs de porosité sont ensuite comparées pour chaque longueur de ligne balayée.

4.5.3 Résultats

Les résultats de l'expérimentation sont présentés sur la Figure 4.19. Dans ce graphique les taux de porosités mesurés dans les pièces et dans les témoins sont reportés pour chaque longueur de ligne testée. La ligne horizontale noire représente le taux de pores naturellement présent dans les pièces. C'est la porosité due aux pores sphériques. Lorsque la porosité dépasse cette ligne, cela signifie que des pores plans se sont formés dans la pièce au cours de la fabrication.

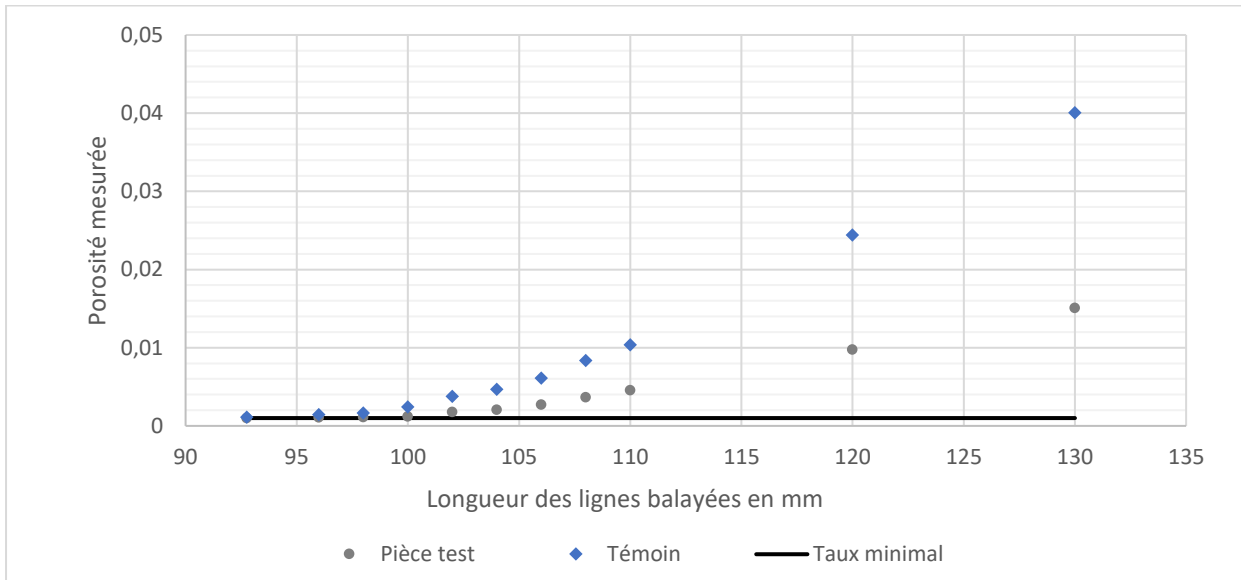


Figure 4.19 Porosité des pièces et des témoins en fonction de la longueur des lignes de fusions

Sur la Figure 4.19, les valeurs de porosité mesurées croissent lorsque la longueur des lignes augmente. Cette observation est vraie pour le témoin et pour la pièce test. Pour les valeurs les plus faibles : 92,5, 96 et 98 mm, la porosité dans le témoin et dans la pièce sont très proches de la porosité nominale du matériau. A partir de 100 mm, une augmentation significative de la porosité est observée dans le témoin. La porosité est toujours plus élevée dans le témoin que dans la pièce.

Sur les images de tomographie, les premiers pores plans apparaissent aux longueurs 98 mm pour le témoin et 100 mm pour la pièce. Conformément aux résultats obtenus sur la porosité, le défaut est d'abord présent dans le témoin, puis dans la pièce. Et lorsque le défaut est présent dans les deux, il est toujours plus important dans le témoin. Les mesures et observations montrent que les porosités mesurées sont identiques sur les longueurs les plus faibles. Puis, plus la longueur augmente, plus l'écart entre les porosités se creuse. Dans les pires conditions, la différence de porosité entre le témoin et la pièce peut atteindre 172 % de la porosité mesurée pour la pièce.

Au cours de l'expérimentation, certaines mesures ont été répétées afin d'obtenir des informations sur la précision des mesures réalisées (voir Tableau 4.3). Dans un premier temps, la méthode de mesure de la porosité est évaluée. Sur une tomographie, la méthode de mesure de la porosité est appliquée à plusieurs reprises et les mesures sont conservées pour chaque itération. Pour cette évaluation, la méthode est appliquée cinq fois sur cinq tomographies de témoins et cinq tomographies de pièces. Pour chaque tomographie, les mesures de porosité sont toujours très proches. Les écarts absolus sont très faibles : $2,7 \cdot 10^{-6}$ en moyenne pour les témoins et $2,9 \cdot 10^{-6}$ pour les pièces. L'écart type relatif à la porosité mesurée est inférieur à 0,1 % quelle que soit la tomographie étudiée. La méthode de mesure est donc précise et répétable pour les échantillons analysés.

Tableau 4.3 Ecart types absolus et relatifs de mesure de porosité pour les témoins et les pièces testées

Porosité	Plusieurs traitements d'une tomographie		Plusieurs tomographies d'un même échantillon		Tomographies de plusieurs échantillons fabriqués à la même longueur	
Ecart type	Absolu	Relatif	Absolu	Relatif	Absolu	Relatif
Témoin	$2,7 \times 10^{-6}$	$< 0,1 \%$	$4,2 \times 10^{-4}$	2,4 %	$5,1 \times 10^{-4}$	4,1 %
Pièce	$2,9 \times 10^{-6}$	$< 0,1 \%$	$1,9 \times 10^{-4}$	1,8 %	$4,7 \times 10^{-4}$	3,9 %

Ensuite, la précision de mesure sur un même échantillon est évaluée. Pour ce faire, plusieurs tomographies ont été faites sur un témoin (ou sur une pièce) à différentes positions. La porosité de ces différentes tomographies est ensuite évaluée. Sur un témoin, l'écart type des mesures de porosité entre différentes positions vaut $4,2 \times 10^{-4}$ soit 2,4 % relativement à la porosité. Les écarts sont plus faibles pour les pièces : $1,9 \times 10^{-4}$ en absolu et 1,8 % en relatif.

Enfin, la porosité est évaluée pour plusieurs témoins et pièces fabriqués à des longueurs de ligne de fusion identiques. Les écarts obtenus sont de $5,1 \times 10^{-4}$ en absolu et 4,1 % en relatif pour les témoins et $4,7 \times 10^{-4}$ en absolu et 3,9 % en relatif pour les pièces.

4.5.4 Critiques et analyses

D'après les résultats, le témoin a une porosité toujours plus élevée que la pièce et les pores sont toujours présents dans le témoin lorsque la pièce test en contient. Lorsque le témoin ne contient pas de pore, il garantit que la pièce n'en contient pas non plus. Ainsi, son rôle de détecteur de porosité est pleinement rempli. Dans la campagne expérimentale, les pores apparaissent dans le témoin à 98 mm et à 100 mm pour la pièce. Cet écart est relativement faible et il limite le risque de faux positif dans la détection de porosité.

Pour chaque longueur testée, la porosité est toujours plus élevée dans le témoin que dans la pièce. La porosité du témoin peut être de 13 à 172 % supérieure à celle de la pièce. Dans sa configuration, le témoin ne permet donc pas une mesure directe de la porosité dans la pièce. En revanche, le fait que sa porosité soit toujours supérieure à celle de la pièce permet de définir une borne supérieure de la porosité de la pièce. Dans aucune configuration, la porosité de la pièce égale celle du témoin. Ainsi, la porosité de la pièce est toujours entre 0,1 % et la porosité mesurée du témoin. Sans offrir une mesure directe de la porosité de la pièce, la porosité du témoin permet de borner les valeurs possibles.

Le protocole de mesure de la porosité et les résultats obtenus ont une bonne précision. La méthode utilisée pour mesurer la porosité à partir de la tomographie offre une excellente précision de mesure. Les différentes initialisations de l'algorithme testées pour une tomographie donnée convergent toujours avec des écarts inférieurs à 0,1 % de la porosité mesurée. La variabilité de la méthode de mesure n'impacte donc jamais le résultat de la mesure de manière significative.

En revanche, l'endroit où est réalisée la tomographie a un impact plus important sur les résultats. Sur un même témoin ou sur un même échantillon de pièce, changer de portion pour la tomographie peut faire varier la porosité de 2,4 % pour un témoin ou 1,8 % pour une pièce. Il y a donc une variabilité plus importante de la porosité au sein d'une pièce ou d'un témoin selon la portion qui est tomographiée. Cette variabilité est aussi importante entre différents témoins et pièces fabriqués dans des conditions identiques : les écarts de porosité sont en moyenne de 4,1 % pour les témoins et de 3,9 % pour les pièces. Bien que les écarts générés par la portion tomographiée ou qui apparaissent entre deux témoins fabriqués avec les mêmes longueurs de lignes balayées soient importants, ils ne permettent pas de mettre en doute le premier constat observé. L'écart entre la porosité dans le témoin et dans la pièce est toujours supérieur aux écarts types additionnés générés. La mesure de la porosité du témoin est donc toujours une borne supérieure de la porosité de la pièce.

Contrairement au témoin de la première approche, ce nouveau témoin impacte très peu la fabrication. Le premier témoin augmente de près de 20 mm la longueur des lignes alors que le témoin tomographié et son annexe n'augmentent que de 2,5 mm la longueur des lignes balayées. Cette approche est également beaucoup plus permissive dans son intégration dans un lot de fabrication. L'espace occupé par le témoin et son annexe est nettement plus faible que dans la première approche. En revanche, la tomographie est un procédé de contrôle coûteux. Malgré les contraintes pour réduire le coût de contrôle du témoin, les frais engendrés par ce contrôle sont supérieurs à ceux du contrôle optique.

Pour les valeurs extrêmes de la campagne expérimentale, la porosité du témoin est très éloignée de celle de la pièce test. Cependant l'évolution des porosités du témoin et de la pièce par rapport à la longueur des lignes semblent liées. Une campagne expérimentale de plus grande ampleur pourrait permettre de faire une régression entre les deux taux et ainsi permettre de déduire avec précision la porosité dans la pièce à partir de celle du témoin.

4.5.5 Conclusion

Cette seconde partie de l'étude fait suite aux conclusions de la première partie. De la même manière que dans l'approche par contrôle optique, les paramètres de fusion sont identiques entre la pièce ou le lot de pièces contrôlé et le témoin. Dans cette approche, le témoin est conçu pour satisfaire les conditions d'une tomographie rapide et permettre un contrôle abordable du témoin. La tomographie permet d'observer la forme et la taille des pores et de mesurer la porosité du témoin. Avec ces informations, il est possible à la fois de détecter la formation de pores plans dans le lot de pièces et d'obtenir une borne supérieure de la porosité du lot de pièces.

La campagne expérimentale montre qu'il est possible de détecter à coup sûr la formation de porosité dans la pièce avec la tomographie du témoin. De plus, le risque de faux négatif est très réduit avec cette méthode. En comparaison avec le témoin de l'approche optique, ce témoin a un impact très faible sur les conditions de fusion du lot produit et il occupe un espace plus réduit de l'espace de fabrication. Cette approche permet donc de détecter la formation des pores plans dans un lot de pièces sans avoir recours à un contrôle destructif ou une tomographie intégrale du lot.

Le témoin permet de valider l'absence de pores plans ou de donner une borne supérieure de la porosité de la pièce. Mais il pourrait aussi servir à mesurer précisément la porosité de la pièce. Pour ce faire, une campagne expérimentale avec un plus grand nombre d'observations devra être menée. Cette campagne servira l'établissement d'une régression entre la porosité du témoin et celle de la pièce contrôlée.

4.6 Conclusion

Dans cette étude, deux approches ont été proposées pour détecter la formation de pores plans dans une pièce ou dans un lot de pièces. Ces approches utilisent le fonctionnement de la machine et la stratégie de balayage pour copier les pires conditions de fusion du lot sur un élément témoin qui est analysé après fabrication. L'élément témoin comporte les signatures de la formation de pores et son analyse permet de détecter ces signatures. Les deux approches se différencient par leur analyse de l'élément témoin.

La première approche consiste à contrôler optiquement la surface supérieure du témoin qui est dégradée lorsque les conditions de fusion sont mauvaises et donc susceptibles de générer de la porosité. La méthode de contrôle associée est rapide et n'engendre pas de frais conséquents. En revanche, l'ajout de l'élément témoin dégrade les conditions de fusion de la production et augmente le risque de créer de la porosité dans les pièces. De plus, cette approche ne permet pas de détecter la formation de pores dans la pièce. La porosité est de 0,4 % lorsque les défauts deviennent visibles à la surface du témoin.

La seconde approche propose un témoin de petites dimensions qui limite l'impact sur les conditions de fusion et qui est adapté à la tomographie. La tomographie permet de détecter la présence de pores. Cette approche offre une meilleure précision pour la détection des pores ainsi qu'un plus faible impact sur les conditions de fusion.

Finalement, selon la configuration du lot qu'il faut contrôler, les deux approches peuvent s'appliquer. A la condition d'avoir suffisamment d'espace disponible dans l'espace de fabrication et de tolérer 0,4 % de porosité dans les pièces, la première approche est applicable et permettra un contrôle simple et rapide. En revanche, si ces deux conditions ne sont pas acceptables, la seconde approche est préférable.

Ces deux approches et les expérimentations associées se basent sur le fonctionnement d'une Arcam A1 avec EBM Control 3.2. Dans les versions ultérieures de machine et de software, les lignes de fusion et les stratégies de balayage sont pilotées différemment. Certains réglages sont nécessaires pour que les approches proposées soient toujours applicables.

Chapitre 5. Mesure de la porosité par tomographie

5.1 Introduction

5.1.1 La tomographie et ses défauts

La tomographie est une technique d'imagerie permettant de construire une représentation volumique d'un corps physique par des mesures réalisées depuis l'extérieur de la pièce. Historiquement, cette technique est utilisée pour faire de l'imagerie médicale (sous l'appellation « scanner ») mais elle est également utilisée aujourd'hui dans l'industrie métallurgique. L'utilisation de cette technologie permet de détecter et localiser des corps étrangers, des calculs, des tumeurs, entre autres, en médecine. Dans l'industrie, la tomographie sert à la détection et localisation de pores, d'amorce de rupture, d'inclusion, etc. Ces deux domaines ont un intérêt important à réaliser une telle inspection sans devoir découper le corps observé en fines tranches.

La tomodensitométrie à rayons X désigne une technologie de tomographie parmi de nombreuses autres. Cette technologie mesure l'absorption des rayons X par la pièce analysée. Le tomographe concerné dans cette étude est un EASYTOM XL 150. Le tomographe est composé d'une source de rayons X orientée sur la pièce analysée. Cette source projette l'ombre de la pièce sur un scintillateur. Le scintillateur émet de la lumière lorsqu'il absorbe des rayons X. Plus le corps analysé absorbe des rayons X plus le scintillateur est sombre. Une caméra réalise alors un cliché du scintillateur, ce cliché correspond à une radiographie de la pièce. Le processus est répété pour plusieurs orientations du corps afin d'obtenir un grand nombre de radiographies. En utilisant des algorithmes de reconstruction volumique et les différentes radiographies réalisées, un modèle volumique d'absorption de la pièce est reconstitué numériquement. Ce processus est illustré sur la Figure 5.1.

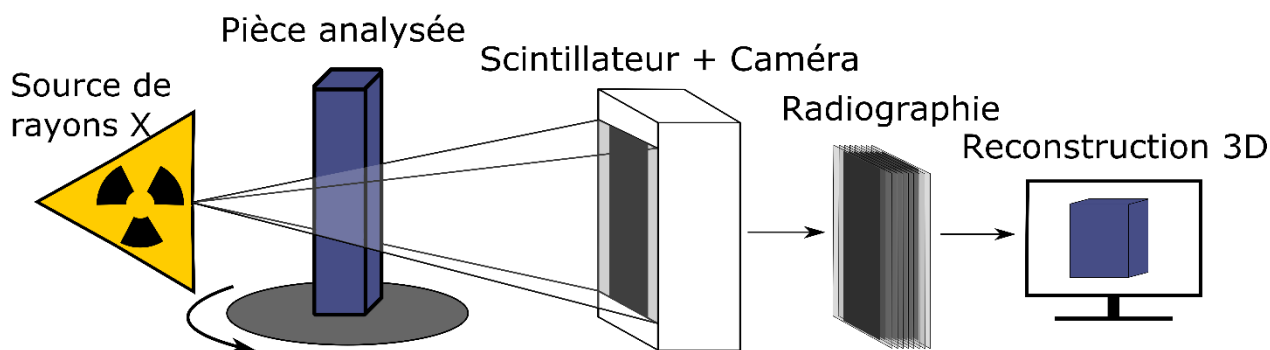


Figure 5.1 Schématisation du procédé de tomographie à rayons X

Le volume reconstruit est composé d'une multitude de voxel dont la couleur est déterminée par la densité du milieu qu'il représente. Lorsque le voxel représente un milieu absorbant, les algorithmes de reconstruction lui attribuent une couleur claire, et, inversement, une couleur sombre lorsqu'il s'agit d'un milieu plus transparent aux rayons X, comme l'atmosphère dans le tomographe par exemple. Les couleurs des voxels sont des nuances de gris codées sur 8 bits et réparties de 0 (noir) à 255 (blanc). La Figure 5.2 représente une tranche virtuelle d'une pièce reconstruite numériquement par la tomographie. Sur cette tranche, les voxels de la tomographie sont représentés par des pixels. Les pixels sont alors une représentation bidimensionnelle des voxels et cette dénomination est conservée dans la suite du document : pixel pour une tranche ou une radiographie et voxel pour la tomographie.

En ajustant les positions relatives de la source, de la pièce et du capteur (composé du scintillateur et de la caméra), il est possible d'ajuster le volume analysé ainsi que la précision de la mesure (i.e. la dimension des

voxels). Plusieurs autres paramètres permettent également d'affiner l'acquisition des radiographies : le temps d'acquisition des radiographies, la puissance de la source, etc.

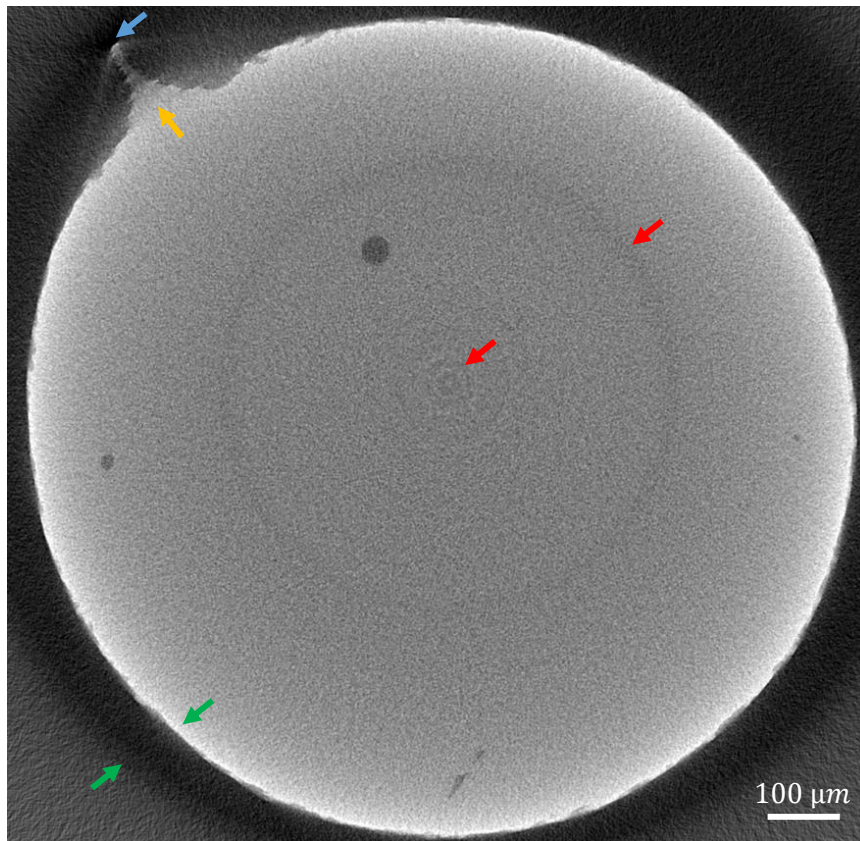


Figure 5.2 Tranche virtuelle réalisée par tomographie d'une pièce cylindrique illustrant les défauts classiques de la tomographie (artefacts annulaires fléchés en rouge, effet de point en bleu, durcissement du spectre en vert, décorrélation en jaune et le bruit visible sur toute l'image)

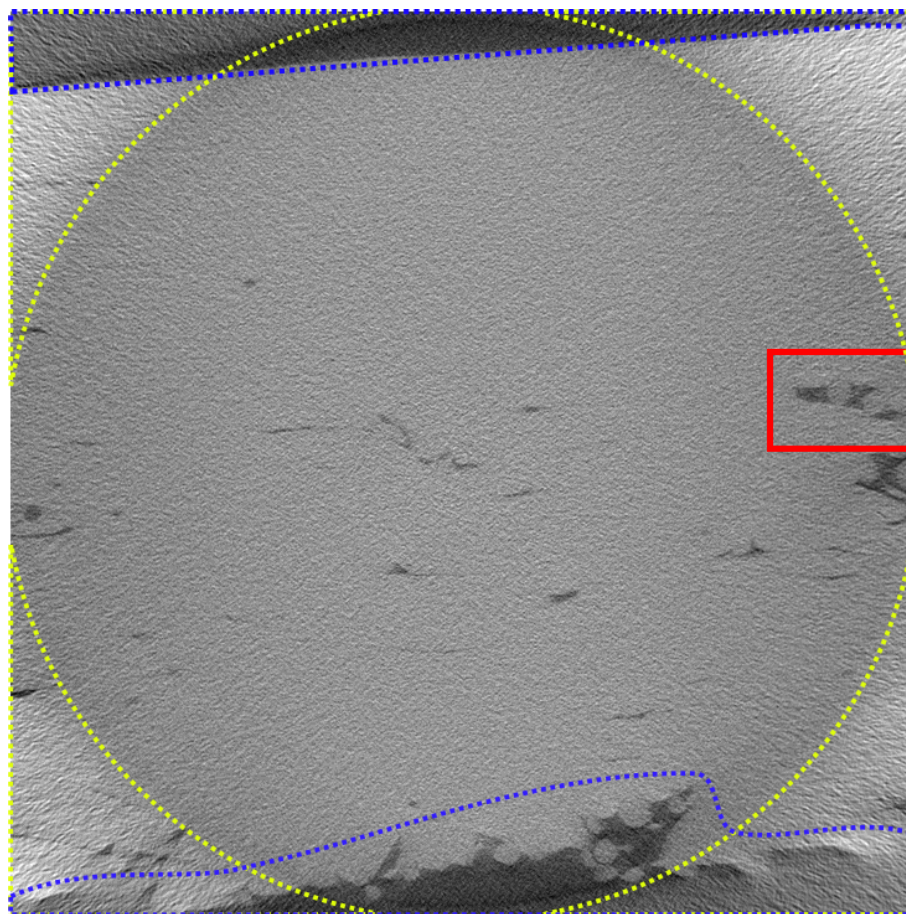
Sur la Figure 5.2, plusieurs artefacts de mesure sont apparents et altèrent l'image. Certains artefacts dépendent de la géométrie observée, sur la figure, il s'agit des effets de pointe et de durcissement de spectre (respectivement fléchés en bleu et en vert). L'effet de pointe apparaît lorsque l'objet analysé comporte des angles vifs ce qui engendre des aberrations sur l'image. Le durcissement du spectre apparaît à la frontière de l'objet observé, il a pour effet d'augmenter grandement le contraste des images à l'interface des deux milieux. D'autres artefacts dépendent directement des propriétés du matériau observé ; sur la figure, le bruit est une illustration d'artefacts dus au matériau très absorbant qu'est le Ti-6Al-4V. Puis il y a les artefacts propres au procédé, comme les artefacts annulaires (en rouge) ou la décorrélation (en jaune). Les artefacts annulaires sont provoqués par une mauvaise acquisition sur un pixel lors d'une radiographie, l'information est localement perdue et l'interprétation du signal par l'algorithme se retrouve erronée. Les artefacts de décorrélation sont engendrés par le croisement d'un nombre trop faible d'informations. Ils apparaissent principalement dans les coins du volume analysé, là où le nombre de radiographies utilisées pour la reconstruction est le plus faible [Thiery, 2013]. Il existe d'autres types d'artefacts engendrés par le procédé de tomographie mais ils ne sont pas apparents sur les images traitées ici et ne sont donc pas pris en compte dans l'étude.

5.1.2 Contexte et problématique

L'objectif qui motive cette étude est la mesure de la porosité de pièce en Ti-6Al-4V. Plus précisément, il s'agit de mesurer avec précision la porosité des témoins présentés dans le Chapitre 4. Cette mesure est réalisée par tomographie sur une portion cubique de 8 mm³ d'un témoin fabriqué en Ti-6Al-4V par une EBM Arcam A1. Dans le Chapitre 4, la porosité d'un témoin est un indicateur de la porosité des pièces que le témoin

permet de contrôler. L'utilisation d'un témoin a pour but de minimiser le coût de contrôle des pièces et pour cette raison le temps d'analyse et le volume analysé par tomographie sont contraints.

Avec les contraintes de tomographie définies au chapitre 4 (environ 1h d'utilisation de la machine), le tomographe permet l'acquisition du scan constitué de 1000 images chacune constituée de 1000x1000 pixels. La résolution des images est définie selon la taille de l'échantillon et les observations recherchées. Dans le cas de l'étude, la pièce est analysée avec la résolution la plus fine possible afin de détecter un maximum de pores et de rester compatible avec les dimensions de la pièce et les contraintes précédemment données. La taille cible est d'environ 2 μm avec une variation de $\pm 0,4 \mu\text{m}$ selon les échantillons analysés (cela dépend de l'agencement de la pièce, de la source et du scintillateur dans le tomographe). Dans ces conditions, les images obtenues comportent quelques artefacts typiques de la tomographie.



*Figure 5.3 Coupe virtuelle d'un témoin tomographié avec identification des défauts :
la décorrélation encadrée en jaune, l'atmosphère en bleu*

La Figure 5.3 illustre les défauts apparents sur les tomographies réalisées dans les conditions précédentes ainsi que ceux qui sont corrigés en amont. Sur cette coupe virtuelle, les artefacts de décorrélation aux coins de l'image (en jaune) sont très importants et génèrent d'importantes aberrations. En revanche, le durcissement du spectre et les artefacts annulaires (respectivement en vert et en rouge sur la Figure 5.2) ont pu être corrigés par les algorithmes de reconstruction. L'image présentée est aussi perturbée par un bruit important. Enfin, une partie de l'image ne représente pas la pièce analysée mais l'atmosphère autour de la pièce (en bleu) et cette partie n'est pas à prendre en compte pour mesurer la porosité.

Ces défauts peuvent en partie être corrigés en ajustant les paramètres d'acquisition comme augmenter le nombre de radiographies où le temps d'acquisition. Cependant, les paramètres d'acquisition ont été choisis pour minimiser le temps et les frais d'utilisation du tomographe. Dans ces conditions, l'objectif de l'étude est

d'évaluer la porosité de l'échantillon avec une bonne précision. La porosité normale des pièces faites en Ti-6Al-4V est de 0,1 % [Suard, 2015], elle est issue du procédé d'obtention de poudre et elle se caractérise par des pores sphériques. Avec une précision de 0,1 % sur les mesures, il est possible de distinguer la part de porosité naturellement présente dans la poudre et celle générée par le procédé.

5.1.3 Les solutions de la littérature et leurs applications

Les méthodes traditionnelles de traitement d'images utilisent généralement la segmentation d'image pour calculer la porosité [Haralick & Shapiro, 1985]. Deux méthodes s'appliquent à la mesure de porosité : le clustering et le seuillage. Le clustering permet de séparer les pixels en clusters (groupes) de pixels ayant des propriétés semblables. En noir et blanc, cela se traduit par des niveaux de gris proches. Le seuillage est un cas particulier de clustering qui ne permet de séparer les pixels qu'en deux clusters de pixels. Il consiste principalement à déterminer un niveau de gris (appelé seuil) qui sépare les pixels en deux groupes. Dans les pièces étudiées, soit les voxels appartiennent à la matière soit ils sont composés de gaz. Les voxels de ces deux milieux sont donc soit très absorbants (la matière) soit presque pas absorbants (gaz) [Thiery, 2013]. Nos exemples ne sont constitués que de deux clusters, le seuillage est donc la méthode traditionnelle adaptée aux besoins de l'étude.

Mais les artefacts tels que le bruit compromettent la simplicité des analyses de la porosité. L'image sur la Figure 5.4 est issue de l'image sur la Figure 5.3 (encadrement rouge) et elle montre un pore dans lequel sont emprisonnés deux grains de poudre inclus dans la pièce. En définissant arbitrairement un seuil sur l'image de gauche, il est possible d'obtenir la discrétisation matière/pore représentée sur l'image de droite. La littérature offre un nombre important de possibilités de définition de seuil basé sur différents paramètres [Haralick & Shapiro, 1985], plusieurs d'entre eux sont appliqués à l'exemple et représentés sur la Figure 5.5.

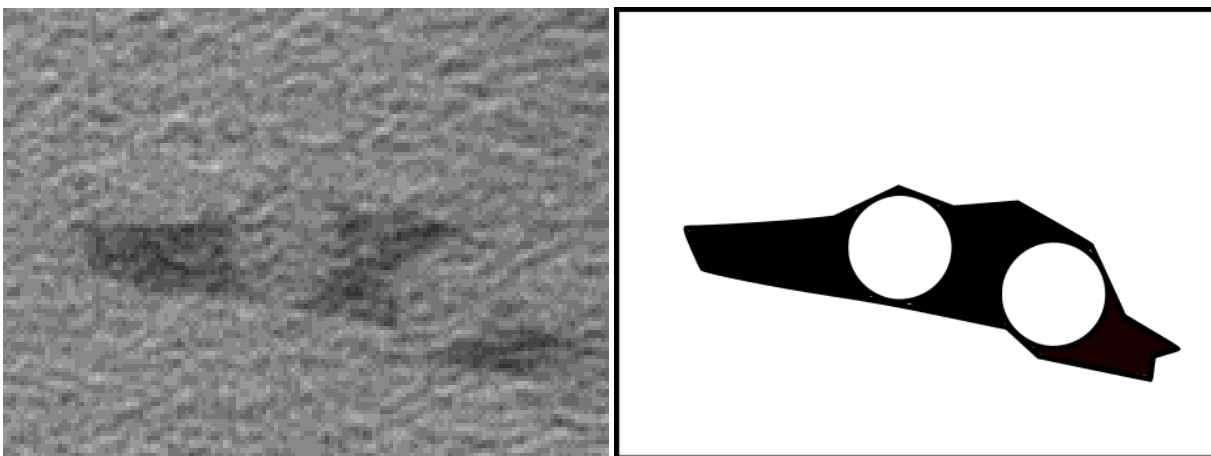


Figure 5.4 Exemple issu de la Figure 5.3 pour illustrer la segmentation d'image par le seuillage à gauche et le résultat attendu après seuillage à droite

Parmi les différentes méthodes de seuillage utilisées, aucune ne permet d'obtenir le résultat attendu. Pour chacune de ces méthodes de seuillage des erreurs sont visibles dans les images seuillées. Plusieurs pixels blancs sont retrouvés au niveau du pore et des pixels noirs sont retrouvés au cœur de la matière. Bien que certaines méthodes soient proches du résultat attendu, il y a un nombre d'erreurs trop important pour que ces méthodes puissent être retenues. Quelle que soit la méthode ou le seuil, le seuillage obtenu n'est pas satisfaisant. Le problème ne vient en réalité pas du niveau du seuil mais du bruit présent sur l'image. Ce bruit a pour effet de rendre quelques pixels appartenant au pore plus clair que d'autres pixels appartenant à la matière. Le seuillage n'est alors pas la méthode idéale pour dissocier les clusters et calculer avec précision la porosité dans les conditions de tomographie de l'étude. Les autres méthodes de segmentation d'image telles que la détection des frontières ne donnent pas de meilleurs résultats.

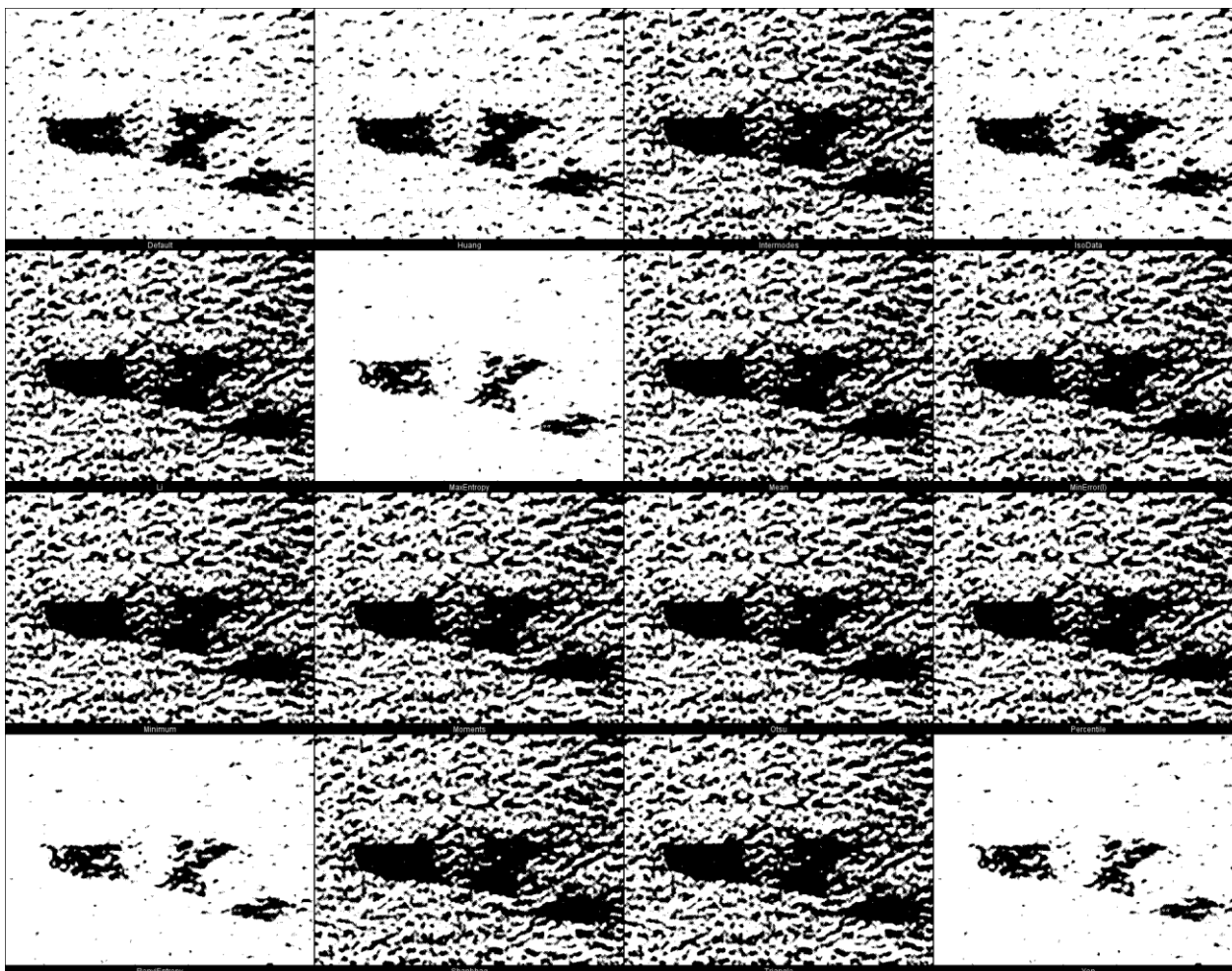


Figure 5.5 Segmentation d'image de la Figure 5.4 selon 16 méthodes de seuillage différentes

Le bruit est un artefact limitant dans l'analyse des images de tomographie. La littérature offre de nombreuses propositions pour réduire voire supprimer le bruit des images en niveau de gris. Babu & Sunitha proposent une méthode pour réduire le bruit statistique (cas dans lequel les pixels sont répartis selon une fonction de densité autour d'une valeur moyenne) [Babu & Sunitha, 2011]. Figueiredo propose une méthode de clustering basée sur la maximisation de la vraisemblance des résultats [Figueiredo, 2005]. Il y a également dans la littérature un nombre important de propositions basées sur l'application successive et croisées de filtres [Krishnan & Viswanathan, 2013 ; Zaitoun & Aqel, 2015]. Pour le problème associé au bruit, la solution la plus appropriée qui a été identifiée dans la littérature, proposée par Bioucas-Dias & Figueiredo fait appel aux modèles de champs de mesure de Markov [Marroquin & al. 2003] et à un algorithme de segmentation supervisé [Bioucas-Dias & al. 2014] pour distinguer plusieurs clusters de pixels dans une image malgré un bruit important [Bioucas-Dias & Figueiredo, 2016].

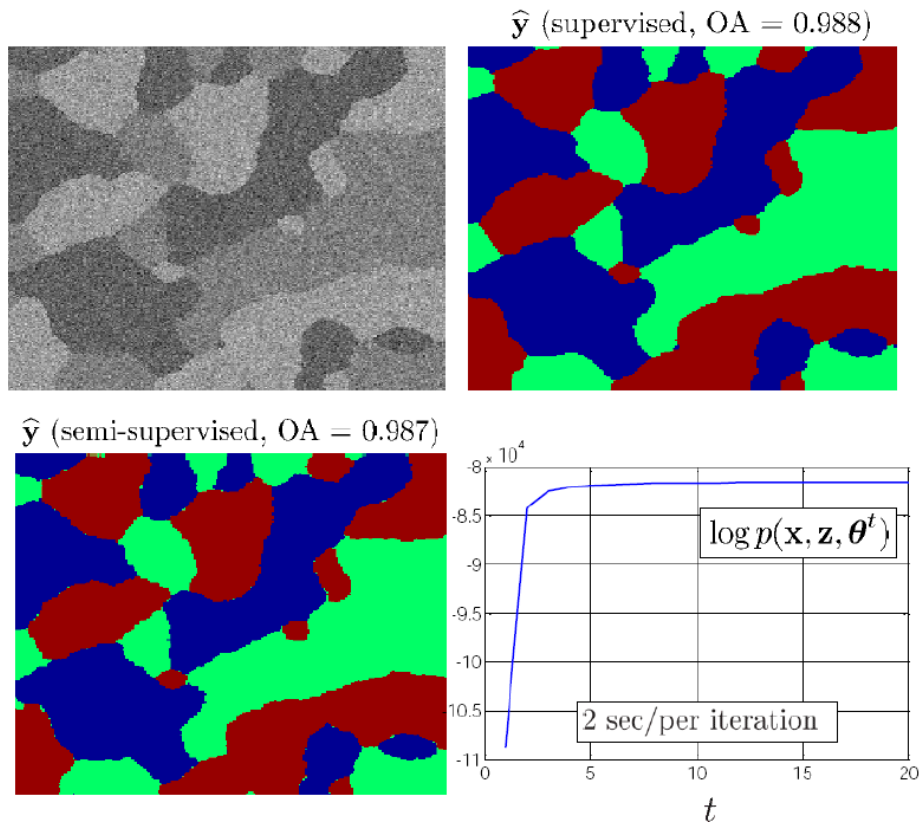


Figure 5.6 Illustration de la méthode “bayesian image segmentation using hidden fields” sur une image simulée de 256x256 pixels (en haut à gauche), supervisée (en haut à droite) et non supervisée (en bas à gauche) [Bioucas-Dias & Figueiredo, 2016]

Comme dans l'exemple présenté sur la Figure 5.4, l'exemple utilisé sur la Figure 5.6 est composé de plusieurs clusters de pixels et dans les deux cas, l'image intègre un bruit important. La solution supervisée de l'algorithme consiste à donner le nombre de clusters observables, ainsi que l'appartenance de plusieurs pixels à un cluster. Cette solution donne le résultat en haut à droite de la figure. Les clusters semblent bien identifiés et la précision globale est de 0,998 (par rapport à l'image simulée). La solution semi-supervisée consiste à simplement donner le nombre de clusters observables. Avec cette seconde solution, les clusters sont visiblement moins précis sur le résultat en bas à gauche de l'image. Cela se ressent sur la précision qui est de 0,987. Les deux solutions convergent en 40 secondes sur un PC standard [Bioucas-Dias & Figueiredo, 2016].

Cependant, les solutions proposées par Bioucas-Dias & Figueiredo ne sont pas adaptées pour le cas étudié pour plusieurs raisons. D'abord, la précision obtenue avec la meilleure solution n'est que de 0,998 soit 0,2 % d'erreur, deux fois plus que l'objectif de l'étude fixé à 0,1 %. Ensuite, des solutions avec un temps de convergence de 40 secondes pour une image de 256x256 pixels semblent inadaptées pour traiter 1000 images de 1000x1000 pixels avec un PC standard. Dans le meilleur des cas, la complexité des algorithmes proposée est en $O(n)$. Cela signifie que le temps de calcul évolue linéairement avec le nombre d'observations. Proportionnellement, cela revient alors à un temps de calcul de 170h pour le cas étudié.

En outre, cet exemple ainsi que de nombreux autres dans la littérature s'intéressent principalement à la reconstruction d'images. Autrement dit, la littérature a pour objectif la classification de tous les pixels dans des clusters. Ce qui permet de connaître ensuite la taille des clusters. Or, dans le contexte de l'étude, seule la taille du cluster pore de l'échantillon est intéressante ; la reconstruction n'est pas nécessaire. Il suffit donc de connaître la taille des clusters pour avoir une mesure de la porosité.

La littérature offre une grande variété de solutions et d'algorithmes permettant de reconstruire les images comportant des défauts. Les solutions de la littérature ne sont pas adaptées au contexte de l'étude, certains algorithmes qui les composent peuvent cependant s'avérer utiles pour notre analyse.

5.1.4 Proposition de solution et plan de l'étude

Pour répondre au problème de mesure de la porosité dans nos échantillons tomographiés, il faut pouvoir caractériser les images et notamment le bruit qu'elles contiennent. De cette manière, il est possible d'évaluer la taille des clusters de pixels contenus dans les images et donc de mesurer la porosité.

Dans un premier temps, les images sont caractérisées de sorte que leurs défauts soient identifiés et qualifiés. Pour chaque type de défaut, une stratégie est définie, elle permet soit d'intégrer le défaut dans la mesure soit d'extraire la partie saine des images. Puis, la méthode numérique de traitement des images est proposée dans un second temps. Cette méthode intègre les stratégies définies précédemment pour traiter l'image et conserver les informations pertinentes. Elle permet de traiter toutes les images d'une tomographie de manière semi-automatique, seule l'initialisation de la méthode requiert encore une intervention. Ensuite, la méthode est évaluée sur plusieurs cas connus ou non et dans plusieurs configurations afin de déterminer sa précision et sa robustesse. Puis les conclusions et perspectives de l'étude clôtureront ce chapitre.

5.2 Caractérisation des images

Pour rappel, une tomographie est composée dans notre cas d'un millier d'images ayant chacune 1000x1000 pixels. Trois défauts ont été identifiés comme problématiques pour l'application directe d'une méthode de seuillage : la présence de l'atmosphère sur les images, les artefacts de décorrélation et le bruit des images.

5.2.1 Recadrage de l'image

Sur les images de la tomographie il est possible de voir apparaître les bords de l'échantillon analysé. Au-delà des bords de la pièce, c'est l'atmosphère dans le tomographe qui est analysée. Les pixels présents au-delà des limites de l'espace peuvent être interprétés comme des pores alors qu'ils n'appartiennent pas au volume de la pièce.

Il faut alors délimiter les bordures de la pièce. Cependant les pièces analysées ne présentent qu'un bord franc qui correspond à la dernière surface fondue du témoin lorsqu'il est fabriqué selon les conditions du Chapitre 4. Les autres surfaces sont affectées par la rugosité et sont en conséquence moins bien définies. Cela s'illustre sur la Figure 5.7 où la surface supérieure est rectiligne et la surface inférieure est irrégulière. Cette irrégularité est caractérisée pour les besoins de l'étude, elle est observable sur les premiers 0,5 mm fabriqués (qui correspond aux dix premières couches fabriquées des pièces, une couche fait 50 μm) [Dinwiddie & al. 2013]. Au-delà, la matière ne présente plus d'irrégularité de la sorte. Compte tenu des dimensions d'une pièce (ici le témoin du Chapitre 4), cela signifie qu'il ne faut analyser que les 1,5 derniers mm.

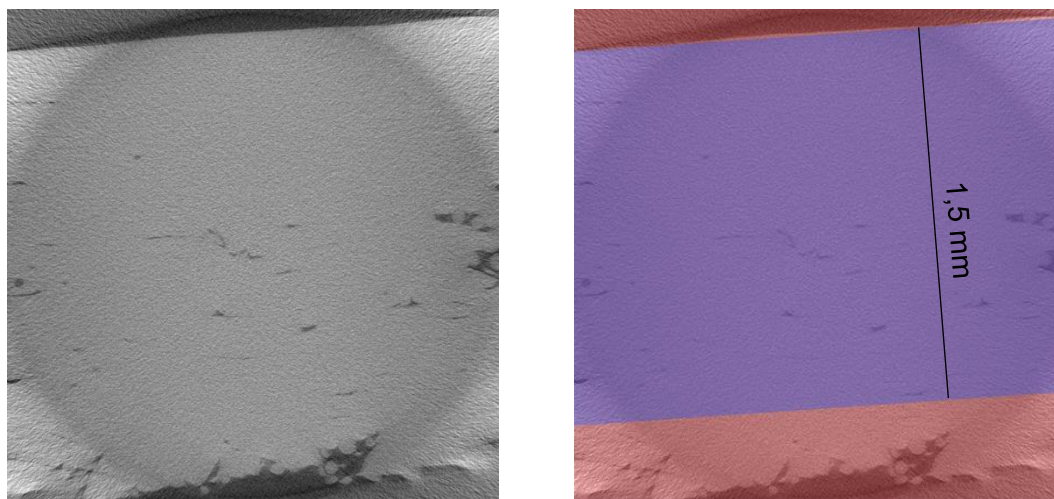


Figure 5.7 Illustration du masquage de l'extérieur de la pièce

Le masquage de l'atmosphère et de la partie irrégulière de la pièce est défini par deux droites parallèles. La première droite est définie numériquement par les coordonnées de deux points distincts placés au niveau de la frontière entre la pièce et l'atmosphère correspondant à la dernière couche fondue. La seconde droite est construite parallèle à la première avec un espacement de 1,5 mm entre les deux droites. Comme les dimensions d'une tomographie sont variables, l'espacement de 1,5 mm correspond à un nombre de pixels variable. C'est la taille des pixels (i.e. la taille des voxels) qui permet de convertir les 1,5 mm en nombre de pixels. Cette distance de 1,5 mm correspond à un écart de 750 pixels lorsque les voxels font précisément 2 μm , cet écart doit être normal à la droite. Ensuite, il est possible que l'échantillon soit légèrement incliné lors de la tomographie. Dans ce cas, le masque doit être décalé entre chaque image. Ce décalage se fait de manière linéaire de la première à la dernière image de la tomographie. Pour réaliser le décalage du masque, les coordonnées des deux premiers points (qui définissent la première droite) sont prises sur la première image de la tomographie et un troisième point est pris sur la dernière image. Ce dernier point permet de déterminer

le décalage sur tout l'échantillon (distance normale entre la droite et le troisième point). Les deux droites qui permettent de définir le masque sont donc décalées entre chaque image et ce décalage vaut 1 millième du décalage total, car il y a 1000 images dans la tomographie.

5.2.2 Artefacts de décorrélation

Les artefacts de décorrélation sont visibles uniquement dans les angles des images (en jaune sur la Figure 5.3). Les défauts générés sont visibles dans les angles de la Figure 5.3 et le centre de l'image reste homogène. Ces artefacts sont générés par une reconstruction à partir d'un nombre plus faible de radiographies. Les pixels sont donc reconstruits avec une information moins complète que ceux au centre. Le volume concerné par le défaut est de 21 % du volume total des images. Une telle perte d'information est non négligeable, cependant une partie des artefacts intervient sur des pixels hors de la pièce, ils sont donc déjà masqués.

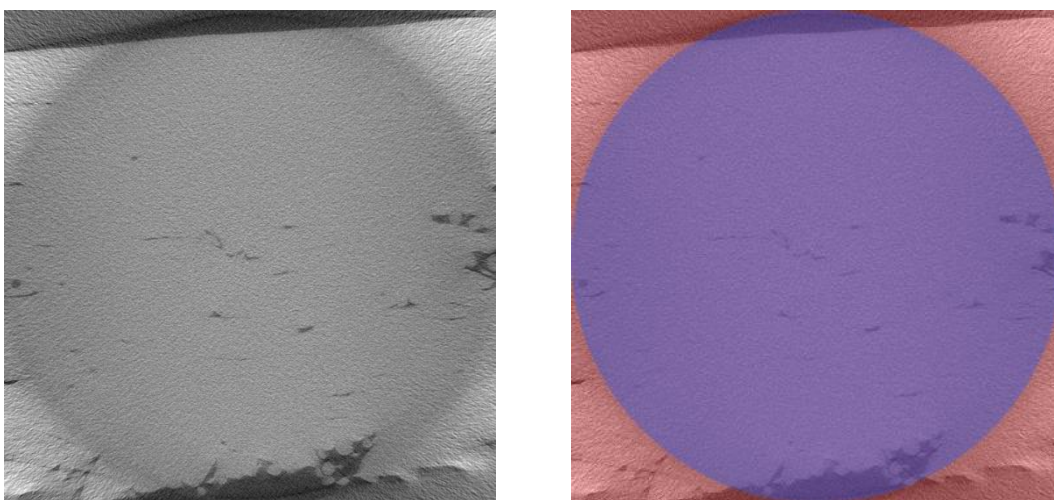


Figure 5.8 Illustration du masquage des artefacts de décorrélation

Un second masque est mis en place pour éliminer les pixels affectés par la décorrélation des images exploitées. Les pixels ayant profité de toutes les radiographies pour être reconstruits sont tous situés sur un disque centré sur l'image et dont le diamètre fait la taille de l'image. Ce masque est illustré sur la Figure 5.8.

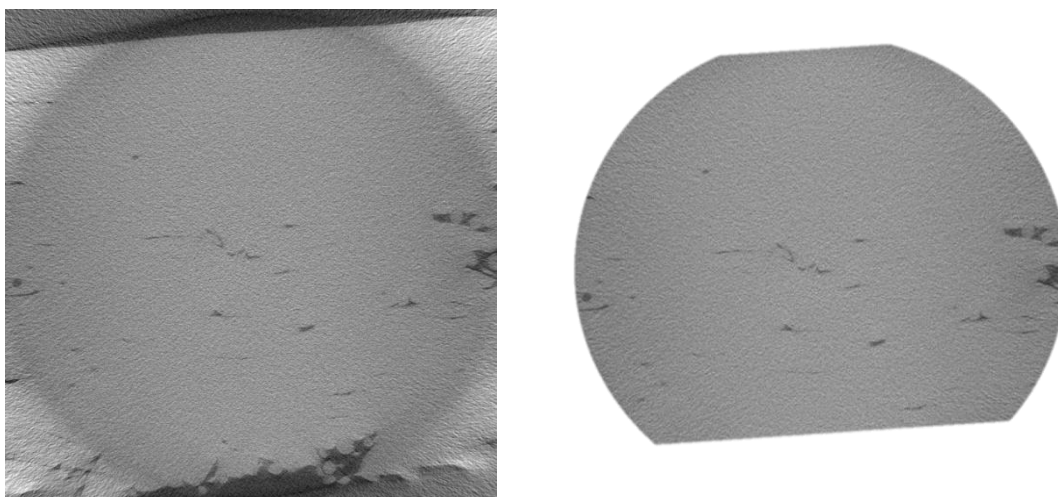


Figure 5.9 Illustration du masque total

Le masquage final permet de transformer l'image initiale avec les artefacts de mesure et les parties extérieures à la pièce en une image seulement faite de pixels correctement reconstruits et pertinents pour la mesure. Le résultat final est illustré sur la Figure 5.9. L'image est alors débarrassée des informations parasites ou inutiles.

5.2.3 Caractérisation du bruit

Dans la littérature, le bruit est souvent identifiable comme une déformation caractéristique d'un signal [Krishnan & Viswanathan, 2013 ; Zaitoun & Aqel, 2015 ; Bioucas-Dias & Figueiredo, 2016]. En observant ce signal du point de vue de l'histogramme d'une image, cela correspond à une répartition des pixels selon une loi de probabilité. En supposant que cela soit vrai pour notre étude, cela signifie que chacun des clusters (matière et pores) est représenté par des pixels dont les nuances sont réparties selon une loi de probabilité propre. Dans la suite du document, le cluster de pixels correspondant à la matière est appelé cluster matière, et réciproquement, le cluster de pixels correspondant aux pores est appelé cluster pore.

Deux échantillons de chaque cluster sont donc analysés afin de vérifier si la répartition des nuances de pixels répond à une loi de probabilité et si l'hypothèse émise précédemment s'avère juste. Le premier échantillon sans pore contient 333882 pixels et son histogramme est visible sur la Figure 5.10. La courbe de répartition s'apparente à une courbe de Gauss, la répartition des nuances pourrait donc se faire avec une loi normale pour le cluster matière. L'hypothèse formulée est alors : les nuances des pixels d'un cluster sont réparties selon une distribution normale.

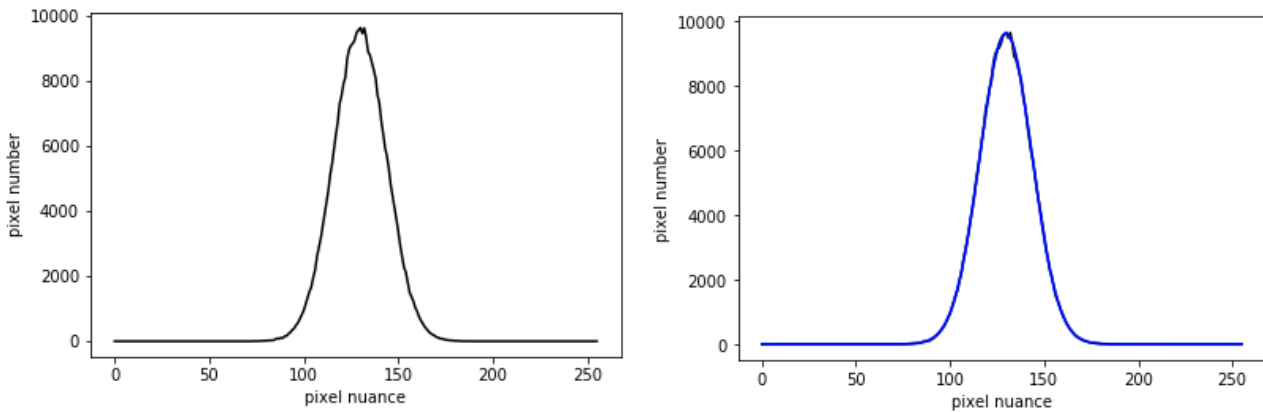


Figure 5.10 Histogramme (en noir) de l'échantillon sans pore seul (à gauche) et superposé avec une répartition (en bleu) suivant une loi normale de paramètre : $\mu = 133,14$ et $\sigma = 16,34$ (à droite)

La moyenne des données issues du cluster matière est de 133,14 et l'écart type est de 16,34. La fonction de densité donnée par la loi normale de paramètre : $\mu = 133,14$; $\sigma = 16,34$ est représentée en bleu sur la Figure 5.10. Les deux courbes semblent correctement se superposer. Pour confirmer statistiquement l'hypothèse de distribution normale, une batterie de tests de normalité est effectuée sur cet échantillon. Les résultats sont présentés dans Tableau 5.1 avec un niveau de signification fixé à 5 %. A part le test de Lilliefors qui suggère de rejeter notre hypothèse, les tests de Shapiro-Wilk, Anderson-Darling et Jarque-Bera ne permettent pas de mettre en doute l'hypothèse. La Figure 5.11 permet également d'apprécier la validité de notre hypothèse par une représentation graphique sous la forme d'une droite de Henry. Ces tests sont répétés sur plusieurs clusters matières et les résultats sont similaires, seuls les paramètres de la loi normale varient entre différentes tomographies. Les résultats sont également semblables pour le spectre du cluster pore. La conclusion est que la distribution de chaque cluster suit une loi normale. Le bruit perçu sur les images est issu de cette distribution.

Tableau 5.1 Résultats des tests de normalité

Shapiro-Wilk	Anderson-Darling	Lilliefors	Jarque-Bera
0,593	0,228	0,041	0,557

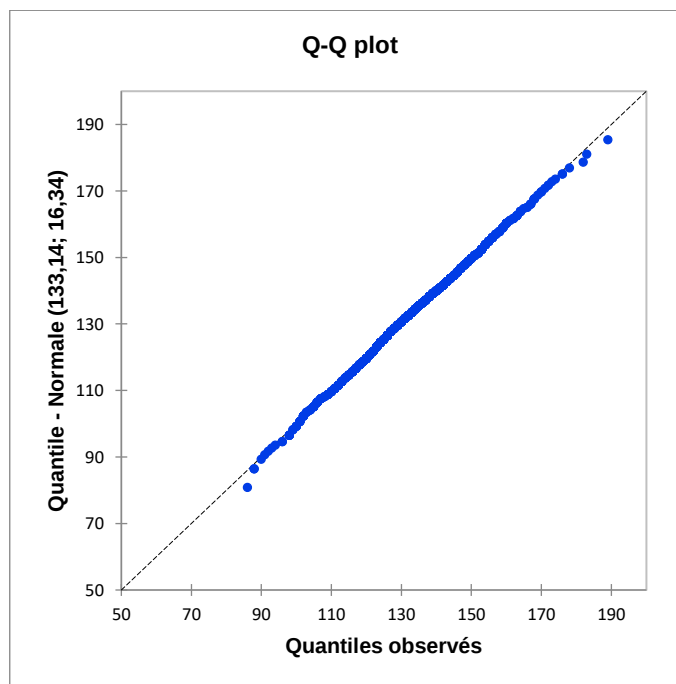


Figure 5.11 Représentation de la distribution par la droite de Henry

Dans les cas concrets de l'étude (ceux qu'il faut caractériser) les deux clusters sont présents. La mesure de la porosité peut alors se faire en comparant la proportion de chaque cluster dans l'image analysée. Lorsque les images ne présentent qu'un cluster, les paramètres de la loi normale peuvent être calculés directement à partir des données. En revanche, lorsqu'elles sont composées de deux clusters, les paramètres des lois respectives ne peuvent pas être calculés directement. Il s'agit là d'un modèle de mélange. Les paramètres des lois qui composent un modèle de mélange peuvent être approximatés par des algorithmes. Dans le cas de l'étude, l'algorithme EM (Expectation Maximization algorithm) permet d'obtenir des paramètres cohérents [McLachlan, 1992]. Il s'agit d'un algorithme itératif qui permet de maximiser la vraisemblance entre une modélisation et des observations. Dans notre cas, la modélisation est faite par deux lois normales (une pour chaque cluster). Les paramètres de ce modèle sont alors la moyenne et l'écart type de chacune des lois normales ainsi que leur proportion dans le mélange. Cette proportion permet de déterminer la taille de chacun des clusters dans la tomographie et c'est une information directe de la porosité de l'échantillon analysé.

5.2.4 L'algorithme Expectation Maximization

Dans le cas de notre étude, l'algorithme est utilisé pour déterminer les paramètres de notre modélisation les plus vraisemblables. Il s'agit là des moyennes, écarts types et proportions des deux lois normales. L'algorithme est d'abord initialisé par la création de paramètres aléatoires pour les deux lois normales. L'algorithme entre ensuite dans une boucle itérative qui comporte deux phases généralement appelées E et M.

La phase E (E pour Expectation) vise à attribuer la responsabilité des observations aux différentes lois. Pour une observation, la responsabilité pour chaque loi est mesurée en calculant la probabilité d'obtenir cette observation selon ladite loi sur la somme des probabilités d'obtenir cette observation avec toutes les lois du modèle. Chaque observation est donc attribuée aux lois du modèle.

La phase M (M pour Maximization) utilise ensuite cette attribution pour améliorer les paramètres du modèle. D'abord, ce sont les proportions des lois qui sont ajustées. Elles sont calculées à partir de la somme des responsabilités des observations rapportée au nombre d'observations, ainsi plus les observations sont attribuées à une seule loi, plus elle aura une proportion importante dans le modèle. Ensuite, les paramètres

des lois sont ajustés, en commençant par la moyenne. La nouvelle moyenne est calculée en faisant une moyenne arithmétique des observations pondérées par la responsabilité de la loi. Puis l'écart type est calculé selon le même principe en prenant en compte la nouvelle moyenne.

A l'issue de la phase M, le modèle dispose de nouveaux paramètres (proportions, moyennes et écarts types). Avec ces nouveaux paramètres, les observations peuvent alors être réattribuées et l'itération suivante peut commencer.

Plusieurs conditions d'arrêt sont possibles pour interrompre l'algorithme. Quelles que soient les distributions modélisées, l'algorithme converge toujours vers un maximum local de vraisemblance [Dempster & al. 1977]. La condition d'arrêt doit permettre à l'algorithme d'avoir un modèle proche de ce maximum local. Pour ce faire, la solution classique proposée par Dempster & al. consiste à stopper l'algorithme lorsque la variation de la vraisemblance entre deux itérations est plus faible qu'un paramètre qui joue alors le rôle de critère de convergence [Dempster & al. 1977]. Il est également possible de limiter l'algorithme à un nombre d'itérations ou encore à un temps de calcul.

Pour éviter de converger sur un minimum local, les algorithmes sont généralement lancés plusieurs fois avec des initialisations différentes. Dans notre configuration, cela n'a jamais été observé dès lors que les paramètres d'initialisation ne sont pas générés avec des valeurs inadéquates (par exemple avec la moyenne et l'écart type à 0).

Maintenant que les stratégies pour traiter les défauts de la tomographie sont déterminées, elles vont être mises en application dans la méthode suivante.

5.3 Méthode de mesure numérique semi-automatique

L'algorithme de mesure de la porosité se scinde en deux parties principales : la création d'un histogramme à partir de la tomographie masquée et la modélisation de l'histogramme.

5.3.1 Création de l'histogramme

Pour rappel, les tomographies sont constituées d'une série de 1000 images contenant chacune 1000x1000 pixels. L'algorithme a pour premier objectif de traiter ces images pour extraire l'information utile de la tomographie. Cette information est représentée sous la forme d'un histogramme, numériquement il s'agit d'un vecteur de taille 256.

Le masque de recadrage est défini par quatre points dont les coordonnées sont renseignées par l'utilisateur sur les images d'une tomographie. Les coordonnées de ces quatre points ainsi que la taille des pixels sont ensuite inscrites dans un document qui est lu par le code. Les deux premiers points (1 & 2) sont mesurés sur la ligne droite de l'échantillon (illustrés sur la Figure 5.12) à la première image de la tomographie. Plus ils sont éloignés plus l'équation de la droite sera précise. Le troisième point est pris aléatoirement dans l'échantillon, il sert simplement à indiquer la position de la matière par rapport à la droite et servira donc à calculer l'équation de la seconde droite. Le quatrième point est mesuré sur la ligne droite de l'échantillon à la dernière image de la tomographie. Pour chaque point, les coordonnées selon les axes $\vec{X}$ et $\vec{Y}$ sont renseignées (comme indiqué sur la Figure 5.12).

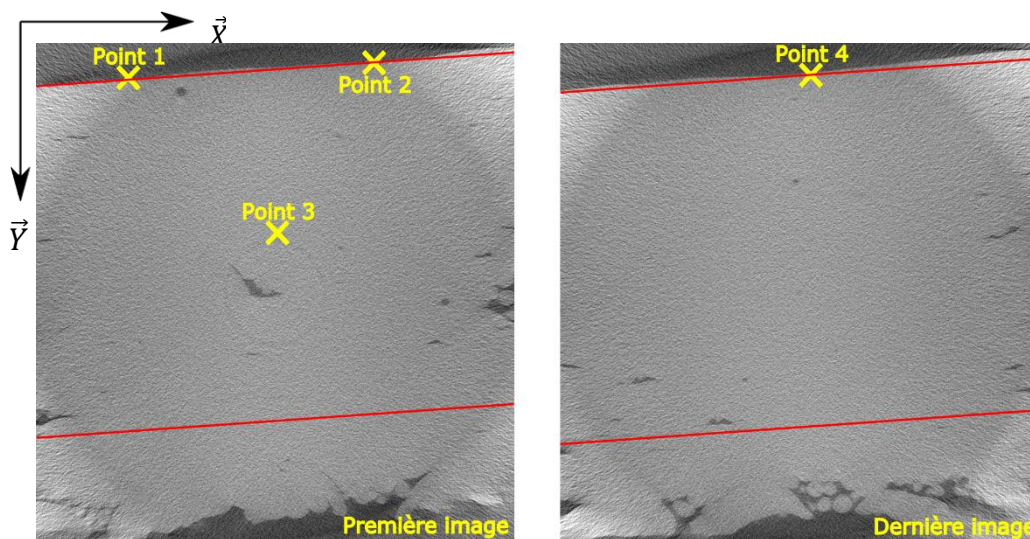


Figure 5.12 Position des points références pour le masque de recadrage

Avec les coordonnées des deux premiers points, l'équation de la première droite est calculée dans le repère de la Figure 5.12. Cela permet de déterminer **a** le coefficient et **bmax** l'ordonnée à l'origine. La position relative du troisième point et la taille des pixels permettent de calculer l'équation de la seconde droite. Cela permet de déduire **bmin**, l'ordonnée à l'origine de la seconde droite. Le quatrième point permet, en comparant avec l'équation de la première droite, de calculer le décalage sur tout l'échantillon. Avec ce décalage total, un paramètre **c** est déterminé. Il s'agit du décalage entre chaque image (le décalage total divisé par le nombre d'images).

Ces équations (illustrées dans la Figure 5.13) permettent de déterminer pour une **image** et une **colonne** données (une coordonnée définie selon $\vec{X}$) la position de deux droites selon l'axe $\vec{Y}$. Ces positions sont les bornes de l'échantillon pour ce couple colonne, image.

```
public int EquationDroiteMin(int image,int colonne){
    return (int) (a*colonne+bmin+c*image);
}

public int EquationDroiteMax(int image,int colonne){
    return (int) (a*colonne+bmax+c*image);
}
```

Figure 5.13 Fonctions utilisant les équations des droites pour le masque de recadrage

Numériquement, la tomographie est uploadée comme un tableau de pixels à trois dimensions : 1000 images de 1000 colonnes et de 1000 lignes. Chaque pixel est représenté par un entier compris entre 0 et 255 correspondant à sa nuance de gris. En réalité les images sont uploadées successivement pour éviter de surcharger la mémoire vive mais la logique reste la même. L'algorithme de création d'histogramme permet d'obtenir l'histogramme de la tomographie avec les masques précédemment établis, il est explicité sur la Figure 5.14.

```
int [] histogramme = new int[256];
for (int image = 0; image < 1000; image++) {
    for (int colonne = 0; colonne < 1000; colonne++) {
        int lmin = Math.max(EquationDroiteMin(image,colonne),0);
        int lmax = Math.min(EquationDroiteMax(image,colonne),1000);
        for (int ligne = lmin; ligne <= lmax; ligne++) {
            if(Math.pow(colonne-500, 2)+Math.pow(ligne-500, 2)<=Math.pow(500,2)){
                histogramme[Tomographie[image][colonne][ligne]]+=1;
            }
        }
    }
}
return histogramme;
```

Figure 5.14 Algorithme simplifié de création d'histogramme

D'abord, l'histogramme est créé et initialisé. L'algorithme parcourt ensuite la tomographie en isolant chaque image puis chaque colonne de chaque image. Pour ces colonnes, les valeurs maximales (**lmax**) et minimales (**lmin**) des lignes sont calculées grâce aux équations définies auparavant (Figure 5.13). Puis pour chaque ligne entre les valeurs min et max, la condition de distance au centre est vérifiée avec la fonction **if** sur la Figure 5.14. Si la condition est validée, la nuance du pixel testé est comptabilisée dans l'histogramme. Ainsi, les fonctions **EquationDroiteMin** et **EquationDroiteMax** permettent de réaliser le masque de recadrage et la condition du test **if** réalise le masque de décorrélation. Les pixels de la tomographie sont ainsi filtrés et l'histogramme de leur nuance est stocké sur un vecteur de taille 256.

5.3.2 Implémentation du Machine Learning

Une fois l'histogramme de la tomographie masquée créé, l'objectif est de traiter les données extraites pour déterminer la porosité de l'échantillon. L'analyse des histogrammes montre que chaque cluster a une signature sur la distribution des nuances. Cette distribution est suffisamment proche d'une distribution normale pour que le cluster puisse être modélisé par une loi normale. Sur l'histogramme total, il y a donc une distribution constituée de deux lois normales qui ont des paramètres différents et qui sont complémentaires en proportion. L'objectif est de mesurer la proportion de chacun des clusters dans l'histogramme. Notre modélisation fait donc intervenir deux lois normales : $N(\mu_1, \sigma_1^2)$ et $N(\mu_2, \sigma_2^2)$ de proportion respective α et $1-\alpha$. La fonction de densité associée à notre modèle est :

$$f(x) = \frac{\alpha}{\sigma_1\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_1}{\sigma_1}\right)^2} + \frac{1-\alpha}{\sigma_2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_2}{\sigma_2}\right)^2}$$

L'algorithme EM est ensuite utilisé pour trouver les paramètres du modèle qui maximisent la vraisemblance avec la distribution observée. L'algorithme fait intervenir tous les paramètres du modèle : $\mu_1, \mu_2, \sigma_1, \sigma_2$ et α .

Lors de l'initialisation, il est possible d'attribuer des paramètres aléatoires à ces deux lois. Les différents cas d'études montrent que les paramètres des lois sont toujours proches. Le cluster pore a une moyenne qui varie entre 50 et 100 alors que celle du cluster matière varie entre 100 et 160. Les écarts types sont également toujours entre 10 et 25. Il est alors préférable de fixer les paramètres initiaux des lois pour augmenter la rapidité de convergence de l'algorithme. Cela n'a pas énormément d'influence sur le résultat mais peut faire gagner un nombre important d'itérations (jusqu'à 128 itérations observées). Dans le reste de l'étude, les paramètres sont attribués aléatoirement afin d'évaluer la robustesse de la méthode. Mais il serait préférable dans une application industrielle d'utiliser, par exemple, les paramètres $\mu = 75$; $\sigma = 20$ pour la première loi et $\mu = 150$ et $\sigma = 20$ pour la seconde.

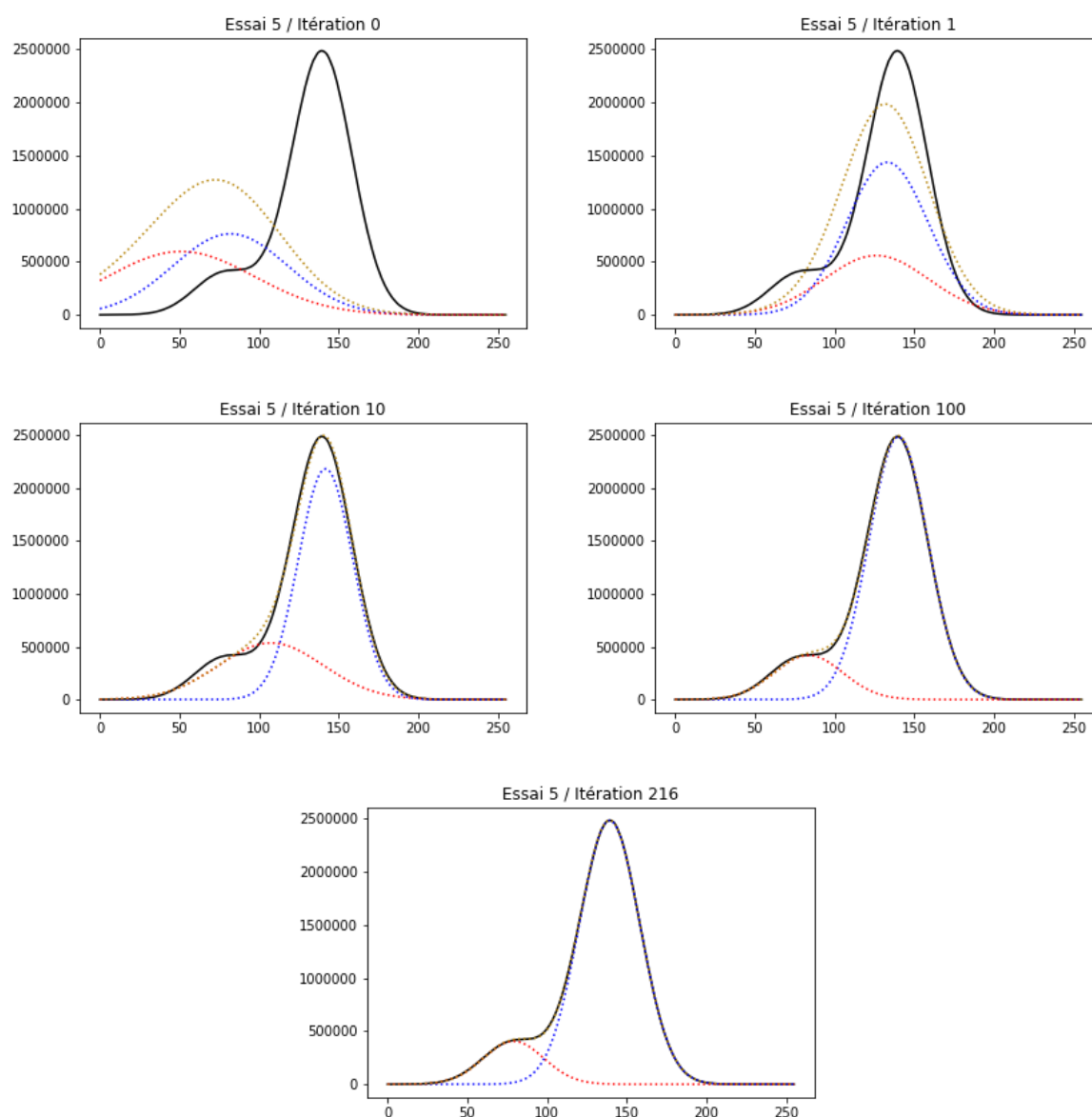


Figure 5.15 Evolution de la modélisation de la distribution à l'initialisation, aux itérations 1, 10 et 100 et à la satisfaction du critère d'arrêt

Pour éviter l'explosion du temps de calcul, il faut placer une condition d'arrêt sur le nombre d'itérations autorisées ou le temps de calcul autorisé. Dans notre cas, la limite du nombre d'itérations est placée à 5000 itérations (5000 itérations sur un milliards d'observations prennent environ 60 minutes sur une machine standard avec une configuration datant de 2015). Le critère de convergence sur la variation de vraisemblance du modèle entre deux itérations est fixé expérimentalement à 10^{-3} . La Figure 5.15 présente l'évolution du modèle sur un exemple à différentes itérations.

Dans la littérature, l'algorithme est lancé à plusieurs reprises avec une initialisation différente pour éviter de prendre un maximum local pour le maximum global. Toutefois, sur nos cas d'étude, les résultats de l'algorithme restent invariants quelle que soit l'initialisation. Seul le temps de calcul est impacté par l'attribution des paramètres initiaux.

Lorsque la condition d'arrêt est satisfaite, l'algorithme renvoie les paramètres du modèle obtenu. La loi normale avec la moyenne la plus faible correspond au cluster le plus sombre ; il s'agit donc du cluster pore, et sa proportion dans le modèle est une mesure de la porosité.

5.4 Résultats et critiques

Pour critiquer la méthode développée, plusieurs exemples réels et plusieurs configurations ont été essayés. Dans un premier temps, la méthode est testée et illustrée sur un exemple contenant un grand nombre de pores. Puis la robustesse de la méthode sera étudiée sur ce même exemple et sur un exemple ne contenant qu'un très faible taux de pores ($\approx 0,1\%$).

5.4.1 Analyse des résultats

L'hypothèse que les nuances d'un cluster de pixels sont distribuées selon une loi normale a été vérifiée précédemment. De cette hypothèse découle l'hypothèse qu'une tomographie est composée de deux clusters (matière et pore) qui conservent leurs propriétés (i.e. leurs nuances sont distribuées selon deux lois normales). Ainsi, la méthode proposée doit permettre de retrouver les caractéristiques du modèle de mélange et permettre d'identifier les tailles des clusters. La Figure 5.16 est un exemple du résultat obtenu pour un échantillon contenant de nombreux pores.

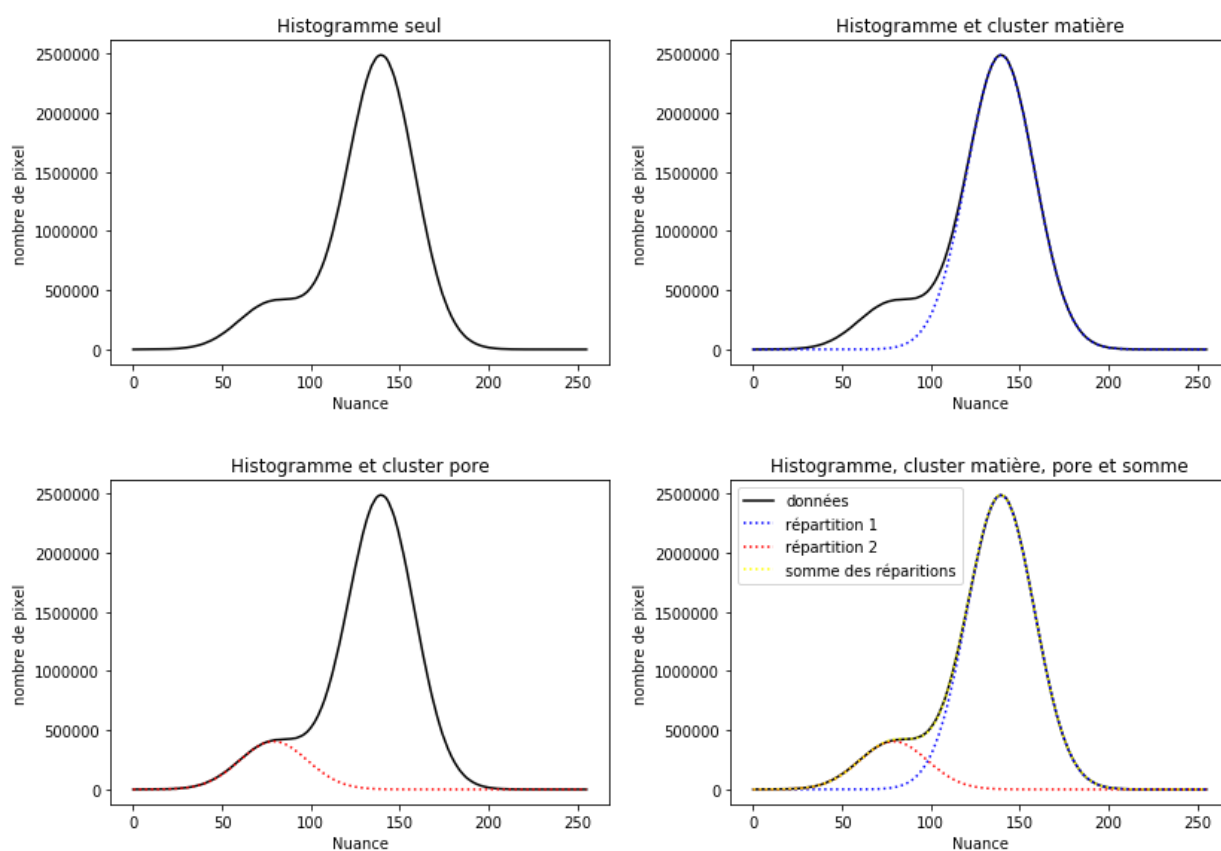


Figure 5.16 Application sur un échantillon poreux avec l'histogramme seul (en haut à gauche), superposée avec le cluster matière mesuré (en haut à droite) et le cluster pore mesuré (en bas à gauche), puis avec les deux clusters et leur somme (en bas à droite).

Sur cet exemple, il est possible d'observer que le modèle total (en pointillés jaunes) et l'histogramme initial (en noir) sont proches. La loi de distribution du cluster pore a pour paramètre : $\mu = 79,02$; $\sigma = 18,95$, celle du cluster matière a pour paramètre : $\mu = 139,31$; $\sigma = 19,01$. Le modèle total est constitué à 13,99 % du cluster pore et 86,01 % du cluster matière. Pour cet exemple, le nombre de pixels mal représentés (il s'agit de l'écart absolu entre le nombre de pixels observés et le nombre pixel du modèle pour chaque nuance du spectre) par ce modèle est de 69093 pixels pour un total de 137699535 pixels, cela correspond à un écart relatif de 0,05 %.

Finalement, l'hypothèse que les nuances des pixels d'un même cluster sont réparties selon une distribution normale a été vérifiée. La seconde hypothèse formulée est qu'une tomographie normale est composée de deux clusters dont les propriétés sont inchangées (les nuances des pixels sont toujours distribuées selon une loi normale propre à chaque cluster). Cette hypothèse semble correcte : les clusters identifiés ont des moyennes et écarts types semblables aux clusters pris seuls et les proportions sont cohérentes avec les images. Les résultats sur plusieurs tomographies montrent qu'il est possible d'approximer la répartition des nuances des pixels par deux lois normales (dont les paramètres sont ajustés grâce à un algorithme EM) avec une bonne précision. Les écarts absolus calculés entre la modélisation et la tomographie varient entre 0,007 et 0,08 %. L'écart absolu évalue le nombre de pixels d'écart entre le modèle et la tomographie, il permet ici de donner une borne supérieure de l'erreur de mesure de la porosité. Les valeurs d'écarts calculés assurent que la précision de la mesure est inférieure à 0,1 %. Cela permet la détection des échantillons ne contenant que des pores sphériques.

5.4.2 Tests de robustesse

Tableau 5.2 Résultats obtenus avec l'algorithme développé pour 20 initialisations aléatoires différentes

Essai	Cluster matière			Cluster pore			Itérations	Temps de calcul (s)
	Proportion	μ	σ	Proportion	μ	σ		
1	86,0075 %	139,31	19,01	13,9925 %	79,02	18,95	111	13,4
2	86,0074 %	139,31	19,01	13,9926 %	79,02	18,95	115	13,9
3	86,0056 %	139,31	19,01	13,9944 %	79,02	18,95	244	21,2
4	86,0056 %	139,31	19,01	13,9944 %	79,02	18,95	245	21,4
5	86,0056 %	139,31	19,01	13,9944 %	79,02	18,95	216	19,6
6	86,0056 %	139,31	19,01	13,9944 %	79,02	18,95	234	20,5
7	86,0056 %	139,31	19,01	13,9944 %	79,02	18,95	258	22,0
8	86,0056 %	139,31	19,01	13,9944 %	79,02	18,95	267	22,5
9	86,0056 %	139,31	19,01	13,9944 %	79,02	18,95	172	17,3
10	86,0056 %	139,31	19,01	13,9944 %	79,02	18,95	115	13,7
11	86,0056 %	139,31	19,01	13,9944 %	79,02	18,95	125	14,5
12	86,0057 %	139,31	19,01	13,9943 %	79,02	18,95	244	21,0
13	86,0074 %	139,31	19,01	13,9926 %	79,02	18,95	110	13,2
14	86,0056 %	139,31	19,01	13,9944 %	79,02	18,95	177	17,5
15	86,0056 %	139,31	19,01	13,9944 %	79,02	18,95	247	21,4
16	86,0056 %	139,31	19,01	13,9944 %	79,02	18,95	168	16,8
17	86,0056 %	139,31	19,01	13,9944 %	79,02	18,95	249	21,5
18	86,0056 %	139,31	19,01	13,9944 %	79,02	18,95	268	22,6
19	86,0056 %	139,31	19,01	13,9944 %	79,02	18,95	243	21,7
20	86,0057 %	139,31	19,01	13,9943 %	79,02	18,95	175	17,1

La première configuration expérimentée consiste à prendre une tomographie et à tester plusieurs fois l'algorithme sur ce même échantillon (le même que pour la Figure 5.15). Les lois normales sont initialisées aléatoirement avec une moyenne entre 50 et 200 et un écart type entre 10 et 50. Des valeurs moyennes trop éloignées comme des écarts types trop faibles peuvent compromettre le bon déroulement de l'algorithme. D'où l'initialisation sur des valeurs généralement atteintes pour la moyenne et supérieures à 10 pour l'écart type. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 5.2. Sur 20 essais, les résultats sont toujours proches. Les paramètres et les proportions des lois normales identifiées pour modéliser la distribution sont identiques entre chaque essai (à 10^{-2} près). La proportion mesurée pour le cluster matière varie entre 86,0056

et 86,0075 %, soit une variation de 0,002 %. Le nombre d'itérations pour satisfaire le critère d'arrêt varie entre 110 et 268, pour un temps de calcul de 13 à 23s (temps de création de l'histogramme inclus).

Dans le cas présenté, un niveau satisfaisant de convergence est atteint en un temps relativement court (entre 10 et 25s). Lorsque les lois sont initialisées avec les paramètres précisés dans la partie 5.3.2, le critère d'arrêt est satisfait après 140 itérations (environ 15s de calcul).

Tableau 5.3 Résultats obtenus pour 20 initialisations aléatoires différentes sur un échantillon peu poreux

Essai	Cluster matière			Cluster pore			Itérations	Temps de calcul (s)
	Proportion	μ	σ	Proportion	μ	σ		
1	99,8631 %	139,44	16,81	0,1369 %	78,73	7,85	448	77,5
2	99,8631 %	139,44	16,81	0,1369 %	78,73	7,85	794	132,7
3	99,8631 %	139,44	16,81	0,1369 %	78,73	7,85	1582	258,4
4	99,8631 %	139,44	16,81	0,1369 %	78,73	7,85	1492	244,0
5	99,8631 %	139,44	16,81	0,1369 %	78,73	7,85	394	68,9
6	99,8630 %	139,44	16,81	0,1370 %	78,73	7,85	1244	204,4
7	99,8630 %	139,44	16,81	0,1370 %	78,73	7,85	1090	179,9
8	99,8630 %	139,44	16,81	0,1370 %	78,73	7,85	87	19,9
9	99,8630 %	139,44	16,81	0,1370 %	78,73	7,85	1204	198,1
10	99,8631 %	139,44	16,81	0,1369 %	78,73	7,85	1139	187,7
11	99,8631 %	139,44	16,81	0,1369 %	78,73	7,85	1968	319,9
12	99,8631 %	139,44	16,81	0,1369 %	78,73	7,85	925	153,6
13	99,8631 %	139,44	16,81	0,1369 %	78,73	7,85	97	21,5
14	99,8631 %	139,44	16,81	0,1369 %	78,73	7,85	1928	313,6
15	99,8630 %	139,44	16,81	0,1370 %	78,73	7,85	1546	252,6
16	99,8631 %	139,44	16,81	0,1369 %	78,73	7,85	1523	249,0
17	99,8631 %	139,44	16,81	0,1369 %	78,73	7,85	296	53,2
18	99,8630 %	139,44	16,81	0,1370 %	78,73	7,85	820	136,8
19	99,8630 %	139,44	16,81	0,1370 %	78,73	7,85	715	120,1
20	99,8631 %	139,44	16,81	0,1369 %	78,73	7,85	1193	196,3

L'algorithme proposé permet donc, en un temps raisonnable, d'obtenir une mesure précise et répétable de la porosité dans un tel échantillon à partir d'une tomographie. En revanche, lorsque l'échantillon contient peu de pores, typiquement lorsqu'il ne contient que des pores sphériques (environ 0,1 % du volume total [Suard, 2015]), l'algorithme demande davantage d'itérations pour converger.

La mesure reste répétable, mais l'initialisation a une part très importante dans le temps de convergence. Il faut cependant noter que dans cette configuration, les proportions sont très inégales et le cluster pore est plus difficile à identifier pour l'algorithme. Il s'agit là de la pire configuration que l'algorithme aura à voir quant aux proportions. Malgré cela, le nombre d'itérations n'excède jamais 2000 et le temps reste inférieur à 10 minutes. Le résultat mesuré valant 0,137 % correspond à ce qu'on trouve dans la littérature : 0,1 % de porosité.

5.4.3 Les limites

La méthode proposée a plusieurs limites concernant la mesure de la porosité.

D'abord, cette méthode ne permet pas de discriminer le cluster des pixels qui peuvent appartenir aux deux distributions. L'approche probabiliste et la modélisation des distributions ne permettent que de donner la probabilité pour un pixel d'appartenir au premier ou au second cluster. Il s'agit là d'une première limite pour la reconstruction de l'image. Bien que ce ne soit pas un objectif dans cette étude, la reconstruction peut

permettre une analyse plus fine de la géométrie, de la taille et de la répartition des pores. De plus, avec une reconstruction, il est plus simple de détecter la formation des pores plans.

La vitesse de traitement des images constitue également une limite. Une partie des erreurs provient de la grosse taille des voxels. Ces erreurs peuvent être limitées en réduisant la taille des voxels. Cependant, lorsque la taille d'un voxel est divisée par deux, le nombre d'observations et donc le temps de calcul (linéairement lié au nombre d'observations) sont multipliés par huit. Cela peut donc s'avérer problématique dans un contexte où les tomographies contiennent davantage de voxels. Cette limite est cependant moins problématique étant donné que la capacité des machines de calculs augmente sans cesse.

5.5 Conclusion

La problématique de la mesure de porosité par la tomographie ne trouve pas de solution adéquate dans la littérature pour les cas de tomographies étudiés. L'analyse des tomographies montre qu'il est possible de traiter chacun des défauts et aléas des tomographies pour rendre possible la mesure de la porosité. La méthode proposée permet de traiter de façon semi-automatique les artefacts de décorrélation ainsi que de recadrer l'échantillon pour chaque image de la tomographie. Enfin, elle permet de mesurer la porosité en tenant compte du bruit important des images. Cette mesure est rendue possible par la modélisation de la distribution des nuances de pixels pour les clusters issus des tomographies et par l'utilisation d'un algorithme EM pour trouver les meilleurs paramètres de cette modélisation.

L'algorithme développé permet de répondre à la problématique soulevée avec une bonne précision et un temps de calcul acceptable. Il s'avère particulièrement efficace lorsque la porosité de l'échantillon analysé est élevée. Plusieurs recommandations sont proposées pour le rendre aussi efficace sur les échantillons contenant peu de pores.

Malgré les corrections apportées, le résultat renvoyé par la méthode est dépendant de la qualité de la tomographie. Bien qu'ils permettent de rattraper certains défauts difficiles à traiter comme le bruit, les algorithmes de la méthode ne traitent pas tous les défauts et les aléas de la tomographie. Le résultat comporte ainsi des écarts de mesure allant jusqu'à 0,08 % dans les cas étudiés. Ces écarts pourraient être en partie diminués par la réduction de la taille des voxels en tomographie ou, dans l'idéal, par la caractérisation des voxels à la frontière entre pore et matière.

Chapitre 6. Conclusions et perspectives

6.1 Conclusions et principaux apports

La maîtrise de la qualité telle que présentée dans la littérature est positionnée sur deux axes :

1. Contrôler la qualité des pièces tout au long du processus de fabrication
2. Optimiser les effets des paramètres du processus et signatures du procédé de fabrication sur la qualité des pièces

De nombreux apports de la littérature pour ces deux axes ont été identifiés et ont permis de distinguer les apports possibles de ces travaux de thèse.

Le premier apport concerne sur l'étude de l'homogénéité de l'espace de fabrication du point de vue de la qualité géométrique des pièces. La méthode développée et la campagne expérimentale montrent que l'espace de fabrication n'affecte pas uniformément la qualité géométrique des pièces. Le positionnement d'une pièce dans cet espace a un impact sur ses qualités géométriques. En complément de ce constat, l'étude propose des solutions permettant de conserver les qualités géométriques des pièces à l'aide de supports ou en délimitant la partie saine de l'espace de fabrication. Ce premier apport vient renforcer l'axe 2 visant à optimiser les effets des paramètres du processus et signatures du procédé de fabrication sur la qualité des pièces.

Le second apport est orienté sur la détection et la mesure de porosité dans les pièces fabriquées. L'analyse du procédé et les méthodes proposées permettent de copier les conditions de fusion des pièces fabriquées dans un élément témoin adapté à un contrôle plus rapide, précis et abordable qu'avec les autres solutions de contrôle existantes. La campagne expérimentale associée montre que la détection de porosité à pores plans est possible avec l'approche du témoin tomographié. Ce second apport est donc un nouvel outil de contrôle des pièces en fin de fabrication contribuant ainsi à l'axe 1.

En supplément de ce second apport, une méthode de traitement d'images adaptée aux images bruitées issues de tomographie est développée. En utilisant et adaptant les algorithmes de la littérature aux cas d'études exposés, le traitement d'images permet de mesurer la porosité présente dans un échantillon tomographié avec efficacité.

6.2 Perspectives

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont permis de valider des hypothèses, d'approfondir des connaissances et de développer des méthodes et outils mais ils ont également amené de nouvelles questions. Chacune de ces études a donc son lot respectif de perspectives. En prenant du recul sur les travaux de la littérature et ceux réalisés, plusieurs autres perspectives surgissent.

Il faut dans un premier temps noter que toutes les expérimentations ont été réalisées sur une seule machine Arcam A1. Il serait intéressant de valider les résultats obtenus sur d'autres machines A1 et d'actualiser les méthodes et résultats sur des versions ultérieures de machine Arcam. Il serait aussi intéressant d'effectuer certains parallèles sur d'autres technologies de fabrication additive sur lit de poudre ou encore sur d'autres types de matériaux : cuivre, inconels, superalliages, etc. Les variations de comportement (conductivité thermique, résistance mécanique, dilatation thermique) entre les technologies de fabrication et les matériaux fabricables peuvent offrir des résultats différents mais également apporter plus d'information pour une meilleure compréhension des phénomènes agissant sur la qualité des pièces.

Dans un second temps, l'approche de contrôle de la qualité par un témoin présentée au Chapitre 4 peut être généralisée à d'autres critères de qualité que le contrôle de porosité. En utilisant les propriétés des stratégies de mises en forme des pièces, cette approche peut être étendue à un contrôle plus général du matériau ; avec potentiellement comme objectif de remplir la fonction d'un contrôle normalisé et remplacer les barreaux traceurs de fabrication généralement utilisés dans l'industrie mais qui ne tiennent aujourd'hui pas compte des stratégies de balayage.

Les systèmes d'instrumentation toujours plus performants offrent de nouvelles perspectives à la maîtrise de la qualité. En premier lieu, ces systèmes permettent d'effectuer un contrôle in situ sur plusieurs critères de qualité. Puis avec une intelligence embarquée, ils parviennent à corriger les défauts des pièces pendant la fabrication. Il est alors possible d'imaginer qu'une machine suffisamment instrumentée et intelligente soit capable d'effectuer plusieurs types de contrôle sur les pièces pendant la phase de fabrication. Aujourd'hui, il est possible de corriger en grande partie la création de pores dans la matière. De telles instrumentations pourraient également permettre de valider le matériau ainsi que la géométrie et de détecter et corriger certains écarts et défauts.

Références

- Arcam, 2017 Arcam AB (28/11/2017). Welcome to Manufacturing Unbound, Arcam Brochure. <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/> (dernier accès le 12/03/2018).
- Arcam, 2011 Arcam AB, Arcam EBM system (2011). User manual, A1 A2. May 2011.
- Arcam, 2008a Arcam AB, Arcam EBM system (12/05/2008). Ti6Al4V Titanium Alloy. <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-Ti6Al4V-Titanium-Alloy.pdf> (dernier accès le 13/03/2018).
- Arcam, 2008b Arcam AB, Arcam EBM system (29/02/2008). Ti6Al4V ELI Titanium Alloy. <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-Ti6Al4V-ELI-Titanium-Alloy.pdf> (dernier accès le 13/03/2018).
- Babu & Sunitha, 2011 K. R. Babu, K. V. N. Sunitha (2011). A New Fuzzy Gaussian Noise Removal Method for Gray-Scale Images. International Journal of Computer Science and Information Technologies, volume 2, issue 1, pp 504-511.
- Bahdou, 2018 F. Bahdou (2018). Microstructure and Mechanical Properties of EBM Processed High and Low Carbon Co28Cr6Mo Before and after HIP'ing. EBAM 2018, 2nd International Conference on Electron Beam Additive Manufacturing, 11-13 April 2018, Nuremberg, Germany.
- Béraud, 2016 N. Béraud (2016). Fabrication Assistée par Ordinateur pour le Procédé EBM. Thèse de Doctorat en Génie insutriel conception et production. Université Grenoble Alpes.
- Béraud & al. 2017 N. Béraud, F. Vignat, F. Villeneuve F, R. Dendievel (2018). Improving dimensional accuracy in EBM using beam characterization and trajectory optimization. Additive Manufacturing, volume 14, pp 1-6.
- Berumen & al. 2010 S. Berumen, F. Bechmann, S. Lindner, J. P. Kruth, T. Craeghs, (2010). Quality control of laser and powder bed-based Additive Manufacturing (AM) technologies. Physics Procedia, volume 5, part B, pp 617-622.
- Bioucas-Dias & al. 2014 J. M. Bioucas-Dias, F. Condessa, J. Kovačević (2014). Alternating direction optimization for image segmentation using hidden Markov measure field models. Proceedings SPIE 9019, Image Processing: Algorithms and Systems XII
- Bioucas-Dias & Figueiredo, 2016 J. M. Bioucas-Dias, M. A. T. Figueiredo (2016). Bayesian image segmentation using hidden fields: Supervised, unsupervised, and semi-supervised formulations.
- Carré, 2016 A. Carré (2016). Dépoudrage de structures treillis réalisées par Electron Beam Melting. Thèse de Master 2, Génie Mécanique, Université Grenoble Alpes.
- Chauvet & al. 2018 E. Chauvet, P. Kontis, E. A. Jägle, B. Gault, D. Raabe, C. Tassin, J.-J. Blandin, R. Dendievel, B. Vayre, S. Abed, G. Martin (2018). Hot cracking mechanism affecting a non-weldable Ni-based superalloy produced by selective electron Beam Melting. Acta Materialia, volume 142, pp 84-94.
- Cheng & al. 2014 B. Cheng, P. Lu, K. Chou (2014). Thermomechanical investigation of overhang fabrications in electron beam additive manufacturing. Conference ASME 2014 International Manufacturing Science and Engineering, June 2014.
- Cheng & Chou, 2015 B. Cheng, K. Chou (2015). Geometric consideration of support structures in part overhang fabrications by electron beam additive manufacturing. Computer-Aided Design, volume 69, pp 102-111.

- Cooke & Soons, 2010 A. L. Cooke, J. A. Soons (2010). Variability in the geometric accuracy of additively manufactured test parts. Proceedings of the 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin (TX), USA, pp 1–12.
- Das & al. 2015 P. Das, R. Chadran, R. Samant, S. Anand (2015). Optimum Part Build Orientation in Additive Manufacturing for Minimizing Part Errors and Support Structures. Procedia Manufacturing, volume 1, pp 343-354.
- Dehoff & al. 2015 R. R. Dehoff, M. M. Kirka, W. J. Sames, H. Bilheux, A. S. Tremsin, L. E. Lowe, S. S. Babu (2015). Site specific control of crystallographic grain orientation through electron beam additive manufacturing. Journal of Materials Science & Technology, volume 31, issue 8, pp 931–938.
- Delfs & al. 2016 P. Delfs, M. Töws, H.-J. Schmid (2016). Optimized build orientation of additive manufactured parts for improved surface quality and build time. Additive Manufacturing, volume 12, part B, pp 314-320.
- Dempster & al. 1977 A. P. Dempster, N. M. Laird, D. B. Rubin (1977). Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), volume 9, issue 1, pp 1-38.
- Dinwiddie & al. 2013 R.B. Dinwiddie, R. R. Dehoff, P. D. Lloyd, L. E. Lowe, J. B. Ulrich (2013). Thermographic in-situ process monitoring of the electron-beam melting technology used in additive manufacturing. Proceedings of SPIE – Defense Security and Sensing 2013, volume 8705, Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXV, 87050K.
- Dinwiddie & al. 2016 R. B. Dinwiddie, M. M. Kirka, P. D. Lloyd, R. R. Dehoff, L. E. Lowe, G. S. Marlow (2016). Calibrating IR Cameras for In-Situ Temperature Measurement During the Electron Beam Melt Processing of Inconel 718 and Ti-6Al-4V. Proceedings of SPIE – Commercial + Scientific Sensing and Imaging, volume 9861, Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVIII, 986107.
- Doutre, 2018 P. T. Doutre (2018). Comment intégrer et faire émerger des structures architecturées dans l'optimisation de pièces pour la fabrication additive par faisceaux d'électrons. Thèse de Doctorat, Université Grenoble Alpes.
- Drescher & al. 2016 P. Drescher, M. Sarhan, H. Seitz (2016). An Investigation of Sintering Parameters on Titanium Powder for Electron Beam Melting Processing Optimization. Materials, volume 9, issue 12, 974.
- Everhart & al. 2017 W. Everhart, J. Dinardo, C. Barr (2017). The Effect of Scan Length on the Structure and Mechanical Properties of Electron Beam-Melted Ti-6Al-4V. Metallurgical and Materials Transactions A, volume 48, issue 2, pp 697-705.
- Everton & al. 2016 S. K. Everton, M. Hirsch, P. Stravroulakis, R. K. Leach, A. T. Clare (2016). Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. Materials and Design, volume 95, pp. 431-445.
- Figueiredo, 2005 M. A. T. Figueiredo (2005). Bayesian Image Segmentation Using Gaussian Field Priors. Energy Minimization Methods in Computer Vision and Pattern Recognition, Chapitre 6, pp 74-89.
- de Formanoir & al. 2016 C. de Formanoir, M. Suard, R. Dendievel, G. Martin, S. Godet (2016). Improving the mechanical efficiency of electron beam melted titanium lattices structures by chemical etching. Additive Manufacturing, volume 11, pp 71-76.
- Galarraga & al. 2016 H. Galarraga, D. A. Lados, R. R. Dehoff, M. M. Kirka, P. Nandwana (2016). Effects of the microstructure and porosity on properties of Ti-6Al-4VELI alloy

- fabricated by electron beam melting (EBM). Additive Manufacturing, volume 10, pp 47-57.
- Galarraga & al. 2017 H. Galarraga, R. J. Warren, D. A. Lados, R. R. Dehoff, M. M. Kirka, P. Nandwana (2017). Effects of heat treatments on microstructure and properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM). Materials Science & Engineering, part A, volume 685, pp 471-428.
- Grasland & Dupont-Calbo, 2016 E. Grasland, J. Dupont-Calbo (2016). L'impression 3D monte en puissance chez les grands industriels. Les Echos, paru 04/04/2016, https://www.lesechos.fr/04/04/2016/LesEchos/22163-075-ECH_l-impression-3d-monte-en-puissance-chez-les-grands-industriels.htm (dernier accès le 25/06/2016).
- Gong & al. 2014 H. Gong, K. Rafi, H. Gu, T. Starr, B. Stucker (2014). Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bedfusion additive manufacturing processes. Additive Manufacturing, volume 1-4, pp 87-98.
- Guo & al. 2015 C. Guo, W. Ge, F. Lin (2015). Effects of scanning parameters on material deposition during ElectronBeam Selective Melting of Ti-6Al-4V powder. Journal of Materials Processing Technology, volume 217, pp 148-157.
- Haralick & Shapiro, 1985 R. M. Haralick, L. G. Shapire (1985). Image Segmentation Techniques. Proceedings, SPIE 0548, Applications of Artificial Intelligence II.
- Hrabe & Quinn, 2013a N. Hrabe, T. Quinn (2013). Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated using electron beam melting (EBM), part 1: Distance from build plate and part size. Materials Science & Engineering, part A, volume 573, pp 264-270.
- Hrabe & Quinn, 2013b N. Hrabe, T. Quinn (2013). Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated using electron beam melting (EBM), part 2: Energy input, orientation, and location. Materials Science & Engineering, part A, volume 573, pp 271-277.
- Hrabe & al. 2017 N. Hrabe, T. Gnäupel-Herol, T. Quinn (2017). Fatigue properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated via electron beam melting (EBM): Effects of internal defects and residual stress. International Journal of Fatigue, volume 94, part 2, January 2017, pp 202-210.
- Hsu & al. 2001 Y-L. Hsu, M-S. Hsu, C-T. Chen (2001). Interpreting results from topology optimization using density contours. Computers & Structures, volume 79, issue 10, pp 1049-1058.
- Jin & al. 2015 Y.-A. Jin, Y. He, J.-Z. Fu (2015). Support generation for additive manufacturing based on sliced data. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, volume 80, Issue 9-12, pp 2041-2052.
- Karlsson & al. 2013 J. Karlsson, A. Snis, H. Engqvist, J. Lausmaa (2013). Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti-6Al-4V powder fractions. Journal of Materials Processing Technology, volume 213, pp 2109-2118.
- Koepf & al. 2018 J. A. Koepf, M. R. Gotterbarm, M. Markl, C. Körner (2018). 3D multi-layer grain structure simulation of powder bed fusion additive manufacturing. Acta Materialia, volume 152, pp 119-126
- Krishnan & Viswanathan, 2013 M. H. Krishnan, R. Viswanathan (2013). A New Concept of Reduction of Gaussian Noise in Images Based on Fuzzy Logic. Applied Mathematical Sciences, volume 7, issue 12, pp 595-602.

- Kruth & al. 2011 J. P. Kruth, M. Bartscher, S. Carmignato, R. Schmitt, L. de Chiffre, A. Weckenmann (2011). Computed tomography for dimensional metrology. CIRP Annals, volume 60, issue 2, pp 824-842
- Ladami & al. 2014 L. Ladani, J. Razmi, S. F. Choudhury (2014). Mechanical Anisotropy and Strain Rate Dependency Behavior of Ti6Al4V Produced Using E-Beam Additive Fabrication. ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, volume 136, issue 3.
- Langelaar, 2016 M. Langelaar (2016). Topology optimization of 3D self-supporting structures for additivemanufacturing. Additive Manufacturing, volume 12, pp 60-70.
- Larsen & al. 2009 S. Larsen, C.G. Jensen (2009). Converting Topology Optimization Results into Parametric CAD Models. Computer-Aided Design And Applications, volume 6, issue 3, pp 407-418.
- Leary & al. 2014 M. Leary, L. Merli, F. Torti, M. Mazur, M. Brandt (2014). Optimal topology for additive manufacture: A method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures. Materials and Design, volume 63, pp 678-690.
- Leutenecker-Twelsiek & al. 2016 B. Leutenecker-Twelsiek, C. Klahn, M. Meboldt (2016). Considering Part Orientation in Design for Additive Manufacturing. Procedia CIRP, volume 50, pp 408-413.
- Lhuissier & al. 2016 P. Lhuissier, C. de Formanoir, G. Martin, R. Dendievel, S. Godet (2016). Geometrical control of lattice structures produced by EBM through chemical etching: Investigations at the scale of individual struts. Materials and Design, volume 110, pp 485-493.
- Lin, 2018 F. Lin (2018). The Hybrid Process Approaches for Electron Beam Selective Melting. EBAM 2018, 2nd International Conference on Electron Beam Additive Manufacturing, 11-13 April 2018, Nuremberg, Germany.
- Mani & al. 2015 M. Mani, B. Lane, A. Donmez, S. Feng, S. Moylan, R. Fesperman (2015). Measurement Science Needs for Real-time Control of Additive Manufacturing Powder Bed Fusion Processes. National Institute of Standards and Technology, standard n° NISTIR 8036.
- Mani & al. 2017 M. Mani, P.W. Witherell, H. Jee (2017). Design rules for additive manufacturing: a categorization. ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, volume 1, 37th Computers and Information in Engineering Conference.
- Marroquin & al. 2003 J. L. Marroquin, E. A. Santana, S. Botello (2003). Hidden Markov Measure Field Models for Image Segmentation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, volume 25, issue 11, pp 1380-1387
- Martin & al. 2015 G. Martin, M. Suard, R. Dendievel, J-J. Blandin (2015). Structures latticess fabriquées par EBM. Présentation aux Journées « La métallurgie en fabrication additive », 18 et 19 novembre 2015.
- McLachlan, 1992 G.J. McLachlan (1992). Discriminant Analysis and Statistical Pattern Recognition. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics.
- Mercelis & Kruth, 2006 P. Mercelis, J-P. Kruth (2006). Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. Rapid Prototyping Journal, volume 12, issue 5, pp 254-265.

- Miesel & Williams, 2015 N. A. Meisel, C. B. Williams (2015). An investigation of key design for additive manufacturing constraints in multimaterial threedimensional printing. *Journal of Mechanical Design*, volume 137, issue 11.
- Mirzendehtdel & Suresh, 2016 A. M. Mirzendehtdel, K. Suresh (2016). Support structure constrained topology optimization for additive manufacturing. *Computer-Aided Design*, volume 81, pp 1-13.
- Moroni & al. 2015 G. Moroni, W. P. Syam, S. Petrò (2015). Functionality-based part orientation for additive manufacturing. *CIRP 25th Design Conference Innovative Product Creation, Procedia CIRP*, volume 36, pp 217-222.
- Morretton, 2018 E. Morretton (2018). Une démarche de conception de pièces légères pour la fabrication additive basée sur l'optimisation topologique. Thèse de Doctorat, Université Grenoble Alpes.
- Moylan & al. 2014 S. Moylan, J. Slotwinski, A. Cooke, K. Jurens, M. A. Donmez (2012). Proposal for a standardized test artifact for additive manufacturing machines and processes. *Journal of Reserch of the National Institute of Standards and Technology*, volume 119, pp 429-459.
- Olmos, 2009 L. Olmos (2009). Etude de frittage de poudre par microtomographie in situ et modélisation discrète. Thèse de Doctorat, Institut polytechnique de Grenoble.
- Osmanlic & al. 2018 F. Osmanlic, C. Arnold, C. Pobel, M. Wormser, C. Körner (2018). Expanding the potential of SEBM through imroved electron beam technology. *EBAM 2018, 2nd International Conference on Electron Beam Additive Manufacturing*, 11-13 April 2018, Nuremberg, Germany.
- Persenot & al. 2017 T. Persenot, J.-Y. Buffiere, E. Maire, R. Dendievel, G. Martin (2017). Fatigue properties of EBM as-built and chemically etched thin parts. *Procedia Structural Integrity 7, 3rd International Symposium on Fatigue Design and Material Defects, FDMD 2017*, pp 158-165.
- Persenot & al. 2018 T. Persenot, G. Martin, R. Dendievel, J.-Y. Buffiere, E. Maire (2018). Enhancing the tensile properties of EBM as-built thin parts: Effect of HIP and chemical etching. *Materials Characterization*, disponible en ligne au 31 January 2018.
- Piaget & al. 2017 A. Piaget, M. Museau, H. Paris (2017). Manufacturing Space Homogeneity in Additive Manufacturing – Electron Beam Melting Case. *Journal of Mechanical Engineering*, volume 63, issue 10, pp 553-558.
- Portolès & al. 2016 L. Portolés, O. Jordá, L. Jordá, A. Uriondo, M. Esperon-Miguez & S. Perinpanayagam (2016). A qualification procedure to manufacture and repair aerospace parts with electron beam melting. *Journal of Manufacturing Systems*, volume 41, pp. 65-75.
- Rafi & al. 2013 H. K. Rafi, N. V. Karthik, H. Gong, T. L. Starr, B. E. Stucker (2013). Microstructures and Mechanical Properties of Ti6Al4V Parts Fabricated by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*, volume 22, issue 12, pp 3872-3883.
- Rai & al. 2017 A. Rai, H. Helmer, C. Körner (2017). Simulation of grain structure evolution during powder bed based additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, volume 13, pp 124-134.
- Raplee & al. 2017a J. Raplee, A. Plotkowski, M. M. Kirka, R. Dinwiddie, R. R. Dehoff, S. S. Babu (2017). Understanding the thermal sciences in the electron beam melting process through in-situ process monitoring. *Proceedings of SPIE*, volume 10169, *Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, and Civil Infrascturcture 2017*.

- Raplee & al. 2017b J. Raplee, A. Plotkowski, M. M. Kirka, R. Dinwiddie, A. Okello, R. R. Dehoff, S. S. Babu (2017). Thermographic Microstructure Monitoring in Electron Beam Additive Manufacturing. *Scientific Reports*, volume 7, 43554.
- Rebaioli & Fassi, 2017 L. Rebaioli, I. Fassi (2017). A review on benchmark artifacts for evaluating the geometrical performance of additive manufacturing processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Volume 93, pp 2571-2598.
- Riedlbauer & al. 2017 D. Riedlbauer, T. Scharowsky, R. F. Singer, P. Steinmann, C. Körner, J. Mergheim (2017). Macroscopic simulation and experimental measurement of melt pool characteristics in selective electron beam melting of Ti-6Al-4V. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, volume 88, issue 5-8, pp 1309-1317.
- Rodgers & al. 2017 T. M. Rodgers, J. D. Madison, V. Tikare (2017). Simulation of metal additive manufacturing microstructures using kinetic Monte Carlo. *Computational Materials Science*, volume 135, pp 78-89.
- Rodriguez & al. 2012 E. Rodriguez, F. Medina, D. Espalin, C. Terrazas, D. Muse, C. Henry, E. MacDonald, R. B. Wicker (2012). Integration of a Thermal Imaging Feedback Control System in Electron Beam Melting. 23rd International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, 2012.
- Sames & al. 2016 W. J. Sames, F. A. List, S. Pannala, R. R. Dehoff, S. S. Babu (2016). The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews*, volume 61, issue 5, pp 315-360
- Sames & al. 2017 W.J. Sames, K.A. Unocic, G.W. Helmreich, M.M. Kirka, F. Medina, R.R. Dehoff, S.S. Babu (2017). Feasibility of in situ controlled heat treatment (ISHT) of Inconel 718 during electron beam melting additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, volume 13, pp 156-165.
- Scharowsky & al. 2017 T. Scharowsky, A. Bauereiß, C. Körner (2017). Influence of the hatching strategy on consolidation during selective electron beam melting of Ti-6Al-4V. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, September 2017, volume 92, issue 5-8, pp 2809-2818.
- Seepersad, 2014 C. C. Seepersad (2014). Challenges and Opportunities in Design for Additive Manufacturing. *3D Printing and Additive Manufacturing*, volume 1, issue 1, pp 10-13.
- Seifi & al. 2017 M. Seifi, A. Salem, D. Satko, J. Shaffer, J. J. Lewandowski (2017). Defect distribution and microstructure heterogeneity effects on fracture resistance and fatigue behavior of EBM Ti-6Al-4V. *Journal of Fatigue*, volume 94, pp 263-287.
- Slotwinski & al, 2014 J. A. Slotwinski, E. J. Garboczi, K. M. Hebenstreit (2014). Porosity Measurements and Analysis for Metal Additive Manufacturing Process Control. *Journal of Research of NIST*, volume 119, pp 494-528.
- SmarTech Report 2017 SmarTech Markets Publishing (2017). Additive Manufacturing with Metal Powders 2017: An Opportunity Analysis and Ten-Year Forecast.
- Smith & al. 2017 C. J. Smith, S. Tamas-Williams, E. Hernandez-Nava, I. Todd (2017). Tailoring the thermal conductivity of the powder bed in Electron Beam Melting (EBM) Additive Manufacturing. *Scientific Reports* 7, article number 10514.
- Strano & al. 2013 G. Strano, L. Hao, R. M. Everson, K. E. Evans (2013). A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, volume 66, issue 9-12, pp 1247-1254.

- Strondl & al. 2015 A. Strondl, O. Lyckfeldt, H. Brodin, U. Ackelid (2015). Characterization and Control of Powder Properties for Additive Manufacturing. *Journal of the Minerals*, volume 67, issue 3, pp 549-554.
- Suard, 2015 M. Suard (2015). Caractérisation et optimization de structures lattices fabriquées par EBM. Thèse de Doctorat, Université Grenoble Alpes.
- Suard & al. 2015 M. Suard, G. Martin, P. Lhuissier, R. Dendievel, F. Vignat, J.-J. Blandin, F. Villeneuve (2015). Mechanical equivalent diameter of single struts for the stiffness prediction of lattices structures produced by Electron Beam Melting. *Additive Manufacturing*, volume 8, pp 124-131.
- Suard & al. 2014 M. Suard, P. Lhuissier, R. Dendievel, J.-J. Blandin, F. Vignat, F. Villeneuve (2014). Towards Stiffness Prediction of Cellular Structures Made by Electron Beam Melting. *Powder Metallurgy*, volume 57, issue 3, pp 190-195.
- Svensson & al. 2009 M. Svensson, U. Ackelid, Arcam AB (2009). Titanium Alloys Manufactured with Electron Beam Melting, Mechanical and Chemical Properties. *Medical Device Materials V*, proceedings from the Materials & Processes for Medical Devices Conference 2009, pp 189-194.
- Tammas-Williams & al. 2017 S. Tammas-Williams, P. J. Withers, I. Todd, P.B. Prangnell (2017). The Influence of Porosity on Fatigue Crack Initiation in Additively Manufactured Titanium Components. *Scientific Reports* 7, article number 7308.
- Tammas-Williams & al. 2016a S. Tammas-Williams, P. J. Withers, I. Todd, P. B. Prangnell (2016). Porosity regrowth during heat treatment of hot isostatically pressed additively manufactured titanium components. *Scripta Materialia*, volume 122, pp 72-76.
- Tammas-Williams & al. 2016b S. Tammas-Williams, P. J. Withers, I. Todd, P. B. Prangnell (2016). The Effectiveness of Hot Isostatic Pressing for Closing Porosity in Titanium Parts Manufactured by Selective Electron Beam Melting. *Metallurgical and Materials Transactions A*, volume 47, issue 5, pp 1939-1946.
- Tammas-Williams & al. 2015 S. Tammas-Williams, H. Zhao, F. Léonard, F. Derguti, I. Todd & P.B. Prangnell (2015). XCT analysis of the influence of melt strategies on defect population in Ti-6Al-4V components manufactured by Selective Electron Beam Melting. *Materials Characterization*, volume 102, pp 47-61.
- Tan & al. 2015 X. Tan, Y. Kok, Y. J. Tan, M. Descoins, D. Mangelinck, S. B. Tor, K. F. Leong, C. K. Chua (2015). Graded microstructure and mechanical properties of additive manufactured Ti-6Al-4V via electron beam melting. *Acta Materialia*, volume 97, pp 1-16.
- Tang & al. 2015 H. P. Tang, M. Qian, N. Liu, X. Z. Zhang, G. Y. Yang, J. Wang (2015). Effect of Powder Reuse Times on Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V by Selective Electron Beam Melting. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, volume 67, issue 3, pp 555-563.
- Thiery, 2013 C. Thiery (2013). Tomographie à rayons X. *Techniques de l'ingénieur CND : méthodes globales et volumiques*.
- Thompson & al. 2016a A. Thompson, I. Maskery, R. K. Leach (2016). X-ray computed tomography for additive manufacturing: a review. *Measurement Science and Technology*, volume 27, issue 7.
- Thompson & al. 2016b M. K. Thompson, G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R. I. Campbell, I. Gibson, A. Bernard, J. Schulz, P. Graf, B. Ahuja, F. Martina (2016). Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals*, volume 65, issue 2, pp 737-760.

- Tiferet & al. 2018 E. Tiferet, M. Ganor, D. Zolotaryov, A. Garkun, M. Chunin, O. Tevet, O. Yeheskel (2018). Mapping the Tray of Electron Beam Melting (EBM) Ti-6Al-4V Samples – Properties and Microstructure. EBAM 2018, 2nd International Conference on Electron Beam Additive Manufacturing, 11-13 April 2018, Nuremberg, Germany.
- Vaidya & Anand, 2016 R. Vaidya, S. Anand (2016). Optimum Support Structure Generation for Additive Manufacturing using Unit Cell Structures and Support Removal Constraint. *Procedia Manufacturing*, volume 5, pp 1043-1059.
- Vastola & al. 2015 G. Vastola, G. Zhang, Q.X. Pei, Y.-W. Zhang (2015). Modeling and control of remelting in high-energy beam additivemanufacturing. *Additive Manufacturing*, volume 7, pp 57-63.
- Vayre & al. 2013 B. Vayre, F. Vignat, F. Villeneuve (2013). Identification on some design key parameters for additive manufacturing: application on Electron Beam Melting. *Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013Procedia CIRP*, volume 7, pp 264-269.
- Vayre, 2014 B. Vayre (2014). Conception pour la fabrication additive, application à la technologie EBM. Thèse de Doctorat, Université Grenoble Alpes, 2014.
- Villar Sanjurjo, 2015 P. Villar Sanjurjo (2015). Supports pour la fabrication par Electron Beam Melting. Thèse de Master 2, Génie Mécanique, Université Grenoble Alpes.
- Wits & al. 2016 W. W. Wits, S. Carmignato, F. Zanini, T. H. J. Vaneker (2016). Porosity testing methods for the quality assessment of selective laser melted parts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, voume 65, pp 201-204.
- Wohlers Report 2018 Wohlers associates (2018). Wohlers Report 2018. 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry. Annual Worldwide Progress Report.
- Wong & al. 2018 H. Wong, C. Sutcliffe, P. Fox (2018). In-Process EBM Monitoring with Electronic Imaging. EBAM 2018, 2nd International Conference on Electron Beam Additive Manufacturing, 11-13 April 2018, Nuremberg, Germany.
- Yang & Anam, 2014 L. Yang, M.A. Anam (2014). An investigation of standard test part design for additive manufacturing. *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium 2014*.
- Yolton & Froes, 2015 C.F. Yolton, F.H. Froes (2015). Conventional titanium powder production. *Science, Technology and Applications, Titanium Powder Metallurgy*, pp 21-32.
- Zaitoun & Aqel, 2015 N. M. Zaitoun, M. J. Aqel (2015). Survey on Image Segmentation Techniques. *International Conference on Communication, Management and Information Technology, Procedia Computer Science*, volume 65, pp 797-806.
- Zhang & al. 2014 Y. Zhang, A. Bernard, R. K. Gupta, R. Harik (2014). Evaluating the Design for Additive Manufacturing: A Process Planning Perspective. *Procedia CIRP*, volume 21, pp 144-150.
- Zhang & al. 2017 Y. Zhang, A. Bernard, R. Harik, K.P. Karunakaran (2017). Build orientation optimization for multi-part production in additive manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, volume 28, issue 6, pp 1393-1407.
- Zhao & al. 2016 X. Zhao, S. Li, M. Zhang, Y. Liu, T. B. Sercombe, S. Wang, Y. Hao, R. Yang, L. E. Murr (2016). Comparison of themicrostructures andmechanical properties of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting and electron beam melting. *Materials and Design*, volume 95, pp 21-31.

- Zinovieva & al. 2018 O. Zinovieva, A. Zinoviev, V. Ploshikhin (2018). Three-dimensional modeling of the microstructure evolution during metal additive manufacturing. Computational Materials Science, volume 141, pp 207-220.
- Zwier & Wits, 2016 M. P. Zwier, W.W. Wits (2016). Design for additive manufacturing: Automated build orientation selection and optimization. 5th CIRP Global Web Conference Research and Innovation for Future Production, Procedia CIRP, volume 55, pp 128-133.

Résumé

En utilisant des solutions de production issues des technologies de Fabrication Additive (FA), l'industrie s'ouvre de nouvelles possibilités pour la fabrication de pièces à haute valeur ajoutée. Dans le but d'être pleinement exploitables, ces procédés de fabrication doivent permettre la réalisation de pièces dont la qualité est adaptée aux besoins de l'industrie. Ces travaux se concentrent sur deux points ciblés de la maîtrise de la qualité en FA appliquée à la technologie Electron Beam Melting (EBM).

Le premier point abordé s'intéresse à l'impact de la position d'une pièce dans l'espace de fabrication d'une machine sur la qualité géométrique de cette pièce. Pour caractériser l'espace de fabrication de la machine Arcam A1, plusieurs séries de pièces sont fabriquées à différentes localisations de l'espace, puis comparées à leur design initial. Les écarts mesurés entre les pièces et leur géométrie souhaitée montrent que la périphérie de l'espace de fabrication est une zone sujette à d'importants défauts géométriques. Ces défauts sont caractérisés et des solutions sont proposées pour en limiter l'impact sur la qualité géométrie des pièces.

Le second point traite de la porosité des pièces fabriquées. Lorsque l'apport énergétique du faisceau d'électrons n'est pas adéquat pour fondre correctement la poudre, des pores peuvent se former dans le matériau des pièces fabriquées. La géométrie et le matériau des pièces rendent difficiles la détection de ses pores. Une méthode de détection est proposée pour révéler la présence de pores dans une pièce via un contrôle standardisé sur un élément qui copie les conditions de fusion de la pièce. Cette méthode propose deux alternatives de contrôle : un contrôle optique (rapide, abordable mais peu précis) et un contrôle tomographique (plus précis que le précédent mais moins rapide et abordable). Un algorithme de traitement d'images innovant a été développé dans le cadre de cette étude afin de rendre les tomographies du témoin plus fiables.

Summary

By using production solutions from Additive Manufacturing (AM) technologies, the industry is opening up new possibilities for manufacturing high added value parts. In order to be fully exploitable, these manufacturing processes must allow the production of parts whose quality is adapted to the needs of the industry. This work focuses on two aiming points of quality control in AM applied to Electron Beam Melting (EBM) technology.

The first point deals with the impact of a part position in the manufacturing space of a machine on the geometric quality of this part. To characterize the manufacturing space of the Arcam A1 machine, several series of parts are manufactured at different locations of the space, then compared to their initial design. The differences measured between the parts and their desired geometry show that the periphery of the manufacturing space is a zone subject to important geometrical defects. These defects are characterized, and solutions are proposed to limit the impact on the geometrical quality of parts.

The second point deals with the porosity of manufactured parts. When the energy supply of the electron beam is not adequate to melt the powder properly, pores can form in the material of the manufactured parts. The geometry and material of the parts make it difficult to detect its pores. A detection method is provided to detect the presence of pores in parts via a standardized control on an item that copies the parts merging conditions. This method offers two control alternatives: an optical control (fast, affordable but not very accurate) and a tomographic control (more accurate than the previous one but slower and costlier). An innovative image processing algorithm is developed as part of this study to make the item tomography scans more reliable.