

Investigation par radiométrie photothermique à balayage de la porosité des pièces fabriquées par fusion par faisceau d'électrons sur lit de poudre.

Investigation of the porosity of parts manufactured by electron beam melting using scanning photothermal radiometry.

Alejandro MATEOS-CANSECO^{1*}, Andrzej KUSIAK¹, Jean-Luc BATTAGLIA¹,
Matthieu MUSEAU², François VILLENEUVE², Alexandre MARGUERET³

¹Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295

F-33400, Talence, France

² Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, UMR 5272

F-38000, Grenoble, France

³ SIMAP - Grenoble

F-38402, Saint Martin d'Hères, France

*(auteur correspondant : alejandro.mateos-canseco@u-bordeaux.fr)

Résumé - Dans le cadre du contrôle non destructif, la radiométrie photothermique à balayage est appliquée à l'investigation de la porosité des pièces métalliques en Ti-6Al-4V réalisées par fabrication additive EBM (Electron Beam Melting). L'évolution de la porosité du matériau fabriqué en fonction des paramètres du procédé EBM est mise en évidence à partir d'images photothermiques. En effet, la signature thermique mesurée est impactée par des changements de la diffusivité thermique apparente du matériau. Cette dernière étant altérée par la présence de pores dans le massif.

Abstract - In the context of non-destructive testing, scanning photothermal radiometry is applied to the investigation of the porosity of Ti-6Al-4V metallic parts produced by EBM (Electron Beam Melting) additive manufacturing. The evolution of the porosity of the manufactured material according to the EBM process parameters is highlighted from photothermal images. Indeed, the measured thermal signature is impacted by changes in the apparent thermal diffusivity of the material. The latter being altered by the presence of pores in the solid metal.

Nomenclature

M	émittance, W/m^2	ϵ	coefficient d'émission
T	température, K	σ	constante de Stefan-Boltzmann, W/m^2K^4
f	fréquence, Hz	ϕ	déphasage, rad, deg.
l	largeur de détecteur, μm	φ	flux de chaleur, W/m^2
r	rayon de flux de chaleur, μm	ω	fréquence angulaire, rad
t	temps, s	<i>Indices et exposants</i>	
v	vitesse, $\mu m/s$	N	magnitude normalisée
<i>Symboles grecs</i>		0	partie continue
α	diffusivité thermique, m^2/s	ω	partie transitoire
Δ	variation, intervalle		

1. Introduction

La fabrication additive est devenue un procédé important dans la production de nouveaux prototypes et de structures aux géométries complexes, difficiles à obtenir par des techniques d'usinage, de déformation ou de fusion traditionnelles. Cette technologie permet en effet de créer des pièces tridimensionnelles directement à partir de modèles informatiques CAO [1]. Bien que la fabrication additive ne soit pas nouvelle, son utilisation connaît une croissance notable. Elle a été largement utilisée pour fabriquer des pièces métalliques fonctionnelles dans les secteurs de l'automobile, de l'aérospatiale, de l'énergie et des dispositifs médicaux, en raison de la flexibilité du procédé, qui permet de réaliser des géométries complexes. Parmi les techniques de fabrication additive, la fusion par faisceau d'électrons (EBM - Electron Beam Melting, pour son acronyme en anglais) est particulièrement utilisée pour la fabrication de pièces en alliage de titane (Ti-6Al-4V), en raison de son application croissante dans les secteurs du biomédical et de l'aérospatial [2].

L'EBM est un procédé de fusion sur lit de poudre, où la poudre métallique est fondue grâce à l'énergie d'un faisceau d'électrons. Un champ magnétique guide la position et le diamètre du faisceau d'électrons, permettant de fabriquer les pièces couche par couche à partir du modèle tridimensionnel du produit. Le procédé EBM se déroule dans une chambre à vide, ce qui protège les matériaux métalliques de l'oxydation. La poudre métallique est déposée en fines couches (comprises entre 50 μm et 200 μm), puis le faisceau d'électrons fond localement la poudre pour créer la géométrie souhaitée. Le plateau descend ensuite dans une plage comprise entre 50 μm et 200 μm , en fonction de l'épaisseur souhaitée, et un râtelier répartit une nouvelle couche de poudre sur la surface. Cette séquence est répétée couche par couche jusqu'à l'obtention de la pièce finale [3].

L'inspection et la détection des défauts, tels que les pores, jouent un rôle crucial dans l'assurance de la qualité des produits finaux issus de la fabrication additive. Parmi les outils d'inspection les plus couramment utilisés, on trouve la tomographie à rayons X, qui permet une analyse tridimensionnelle des structures internes, et la microscopie électronique à balayage, idéale pour examiner les défauts sur la surface à l'échelle microscopique. En complément, des techniques basées sur la thermographie infrarouge sont développées pour le contrôle non destructif et les inspections de structures composites. D'autres approches, comme les ultrasons, l'interférométrie laser et les tests électromagnétiques, sont également employées pour détecter et caractériser les défauts de surface ou internes dans divers matériaux. Ces technologies permettent de répondre aux exigences croissantes en matière de fiabilité, de performance et de conformité aux normes industrielles [4].

Dans le cadre du contrôle non destructif des pièces produites par fabrication additive nous proposons l'utilisation de la technique radiométrie photothermique à balayage (RPB) pour investiguer la détection de défauts des pièces en alliage de titane (Ti-6Al-4V) fabriquées par EBM et leur application dans l'estimation de la porosité. L'avantage de l'approche par RPB par rapport à la thermographie infrarouge (IR) repose dans la possibilité d'explorer des temps caractéristiques inaccessibles aux caméras IR et l'accès à des résolutions plus élevées. Dans ce travail, nous nous concentrons sur une analyse qualitative des résultats, ainsi que sur l'exploration de différentes fréquences en vue d'une application future dans la reconstruction 3D de pièces complexes, en exploitant la variation de la profondeur d'exploration en fonction de la fréquence.

2. Matériaux et mesures

Le matériau investigué est un échantillon en alliage de titane (Ti-6Al-4V) produit à Grenoble. L'objectif général du travail est l'étude de l'impact de la variation de paramètres du procédé EBM sur la qualité des pièces produites. Cela à travers de l'examen de la porosité du matériau.

2.1. Échantillon

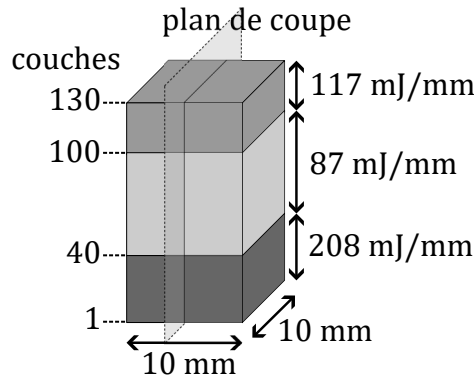


Figure 1 : Schéma de l'échantillon

L'échantillon est constitué de 130 couches de 50 μm d'épaisseur, fabriquées avec trois densités d'énergie différentes, comme illustré sur la Figure 1. Une fois la fabrication EBM réalisée, l'échantillon est découpé en deux dans le plan transversal, puis poli avec des feuilles abrasives en carbure de silicium à grains P800, P1000 et P2000 pour obtenir une surface plane pour pouvoir réaliser des mesures.

2.2. Radiométrie photothermique à balayage

La radiométrie photothermique à balayage (RPB) est une technique d'imagerie photothermique basée sur la radiométrie photothermique en régime modulé. Elle repose sur l'utilisation de détecteurs infrarouges (IR) pour mesurer le rayonnement IR émis par une surface en réponse à une excitation photothermique transitoire et locale. Tout corps à température supérieure au zéro absolu émet un rayonnement électromagnétique dû à l'agitation thermique des charges dans la matière. Le rayonnement thermique émis est fonction de la température de surface, T , et est exprimé selon la loi de Stefan-Boltzmann comme $M = \epsilon\sigma T^4$, où ϵ est le coefficient d'émission de la surface et $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ est la constante de Stefan-Boltzmann.

La Figure 2 présente le schéma du dispositif expérimental développé à l'I2M de Bordeaux [5]. Lors de mesure par RPB, un faisceau laser continu avec la longueur d'onde de 1064 nm, est modulé à une fréquence f par un modulateur acousto-optique (MAO). Ensuite, le faisceau laser modulé est focalisé sur la surface de l'échantillon à l'aide d'un miroir parabolique hors axe (MP), ce qui produit une source de chaleur superficielle de rayon $r = 3 \mu\text{m}$ sur la face supérieure de l'échantillon. Le flux de chaleur absorbé par l'échantillon induit une variation de température et, en conséquence, une modification de l'émittance de la surface de l'échantillon. En considérant un flux de chaleur périodique $\varphi = \varphi_0 \cos(\omega t)$ (avec $\omega = 2\pi f$) appliqué sur la surface de l'échantillon, la variation de température se compose d'une partie continue et d'une partie transitoire : $\Delta T(t) = \Delta T_0 + \Delta T_\omega \cos(\omega t + \phi)$. En supposant que l'excita-

tion est suffisamment faible pour produire une variation de température limitée, la variation de l'émission dans la plage de longueurs d'onde infrarouge peut être linéarisée comme suit [6] : $\Delta M \approx 4\epsilon\sigma\Delta T_0^3\Delta T_\omega \cos(\omega t + \phi)$.

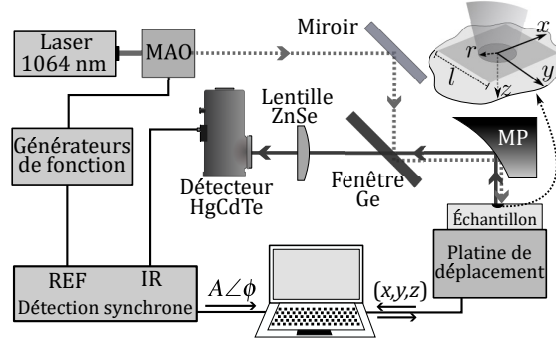


Figure 2 : Schéma de dispositif expérimental de radiométrie photothermique à balayage

La variation de l'émission thermique (ΔM) dans une région carrée de côté $l = 11 \mu\text{m}$, située à la surface de l'échantillon, est collectée à l'aide d'un miroir parabolique et enregistrée par un détecteur infrarouge. Le signal collecté par le détecteur est ensuite mesuré en amplitude, $A(\omega)$, et en phase, $\phi(\omega)$, avec un amplificateur à détection synchrone. En supposant une condition linéaire, sous faible perturbation, l'émittance modulée enregistrée par le détecteur infrarouge s'exprime comme $\Delta M = A(\omega)e^{j\phi(\omega)}$, avec $A(\omega)$ proportionnelle à l'amplitude de la variation de température ΔT_ω , et la phase du signal, $\phi(\omega)$, correspondant au déphasage de température par rapport à l'excitation du faisceau laser. Cette configuration d'excitation et de mesure locale est représentée en Figure 2.

L'échantillon est monté sur une platine de translation permettant de contrôler la vitesse de déplacement et la position de l'échantillon avec une précision micrométrique. L'imagerie thermique de l'échantillon est réalisée à partir de mesures pixel par pixel en balayant la surface de l'échantillon ligne après ligne à vitesse constante. L'échantillon est déplacé à une vitesse constante $v = \Delta x / \Delta t$ dans le plan perpendiculaire à l'axe du faisceau laser, tandis que le point d'excitation et de mesure restent fixes. Chaque ligne de balayage est divisée en intervalles d'échantillonnage Δx , qui correspondent à la résolution des pixels de l'image finale. Enfin, l'acquisition des données par l'amplificateur à détection synchrone est pilotée par un taux d'échantillonnage Δt . De cette manière, chaque pixel contient l'information sur la température moyenne dans la région définie par l'échantillonnage spatial Δx et temporel Δt . Il convient de souligner que la calibration de l'amplitude du signal mesuré en fonction de la variation de température nécessite la connaissance du coefficient d'émissivité de la surface de l'échantillon, une donnée difficile à déterminer, notamment pour des matériaux non homogènes. Par conséquent, dans ce travail, nous présenterons l'amplitude normalisée.

3. Résultats et analyse

Une région de $4 \times 5,5 \text{ mm}^2$ sur la coupe transversale a été imagée par RPB afin d'évaluer le potentiel de la technique dans ce cadre d'application. Les images thermiques obtenues pour quatre fréquences d'exploration différentes, à savoir 100 kHz, 10 kHz, 1 kHz et 103 Hz, sont présentées sur les Figures 3, 4, 5 et 6, respectivement. Pour les expériences à 100 kHz, 10 kHz et 1 kHz, une vitesse de balayage de $v = 322 \mu\text{m/s}$ a été utilisée, tandis que pour l'expérience

à 103 Hz, une vitesse de $v = 80 \mu\text{m/s}$ a été nécessaire afin d'obtenir des mesures stables. Ceci étant dû à la durée d'établissement du régime thermique périodique établi à la surface de l'échantillon. Dans tous les cas, l'échantillonnage spatial est fixé à $\Delta x = 10 \mu\text{m}$. Enfin, pour chaque expérience, l'amplitude locale a été normalisée par rapport à sa moyenne sur toute image.

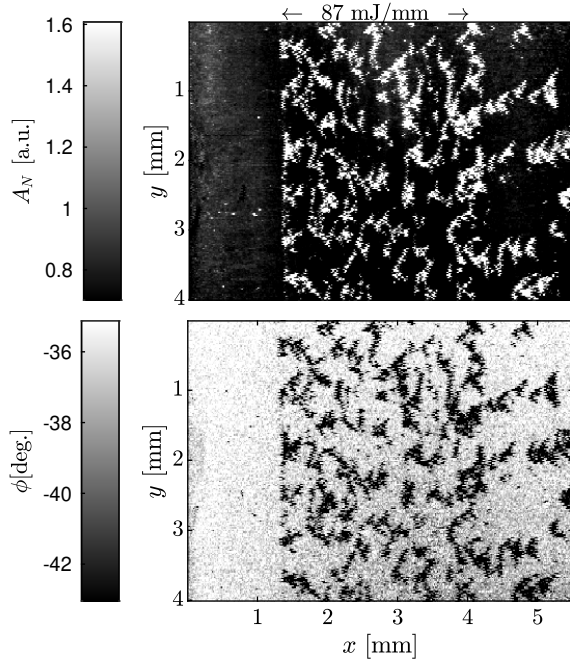


Figure 3 : Image thermique à 100 kHz

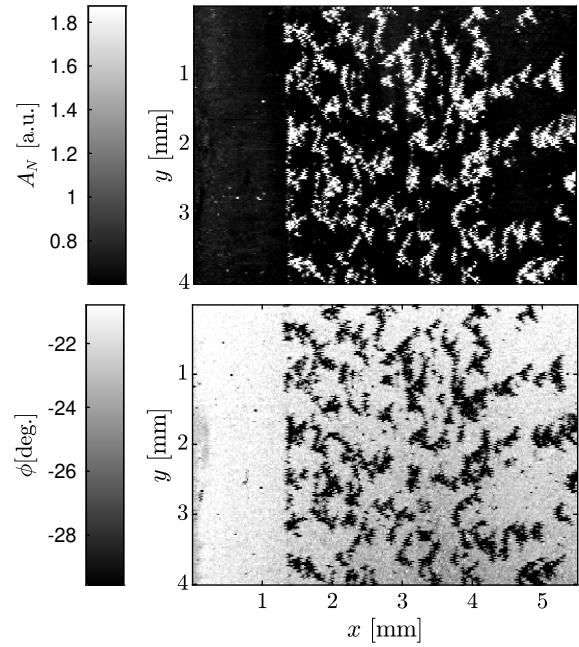


Figure 4 : Image thermique à 10 kHz

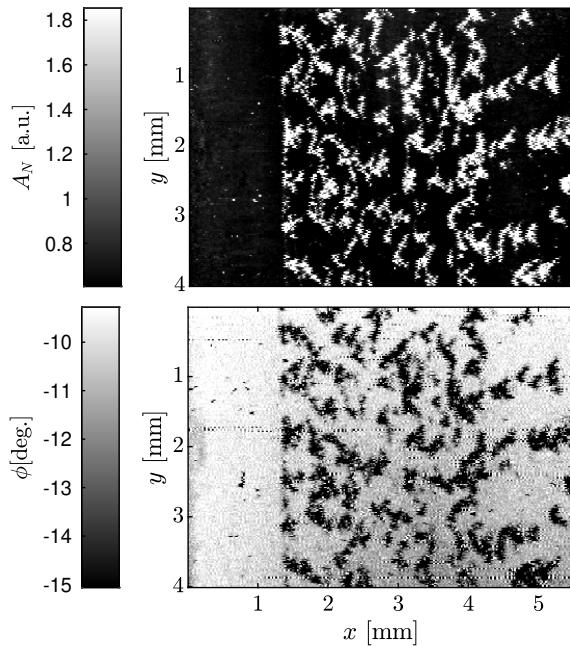


Figure 5 : Image thermique à 1 kHz

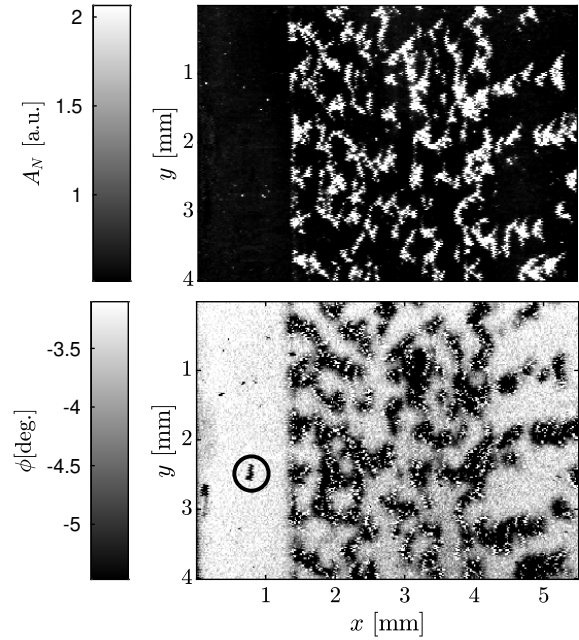


Figure 6 : Image thermique à 103 Hz

Sur les images d'amplitude et de phase, on peut distinctement observer les trois régions fusionnées avec des densités énergétiques différentes. La région la plus uniforme, située à gauche, correspond à celle fabriquée avec une densité de 208 mJ/mm. Pour référence, la région à 87

mJ/mm est délimitée dans la Figure 3. De gauche à droite, on observe une augmentation suivie d'une diminution de la fraction de porosité. Cette porosité est générée lorsque les conditions énergétiques ne sont pas suffisantes pour assurer la fusion complète de la poudre. La diminution de l'apport énergétique provoque l'apparition de défauts de forme irrégulière, mais distribués de façon périodique et alignés de manière successive, ce qui est particulièrement évident dans la région située à droite. Ce phénomène a été signalé par [7, 8, 9], qui a conclu que les défauts sont souvent créés au-dessus des pores de la couche précédente en raison de l'instabilité dans la région de fusion.

On observe que l'image d'amplitude reste presque invariante pour les quatre fréquences d'exploration. En revanche, dans les images de phase, un apparent élargissement des défauts est visible à basse fréquence (103 Hz). Ce comportement peut s'expliquer par l'augmentation de la zone explorée par pixel à basse fréquence, en raison de l'allongement de la longueur de diffusion thermique. Cependant, il n'est pas possible d'affirmer si cet élargissement correspond à une extension réelle des défauts sous la surface ou s'il s'agit d'un phénomène superficiel lié à l'effet de paroi des défauts et à la résistance thermique associée [10].

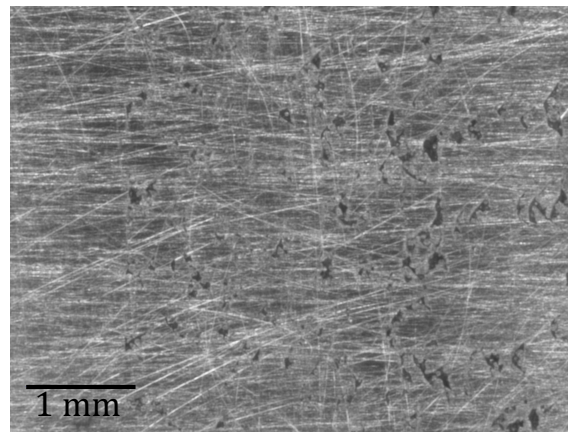


Figure 7 : Image de la surface en lumière visible

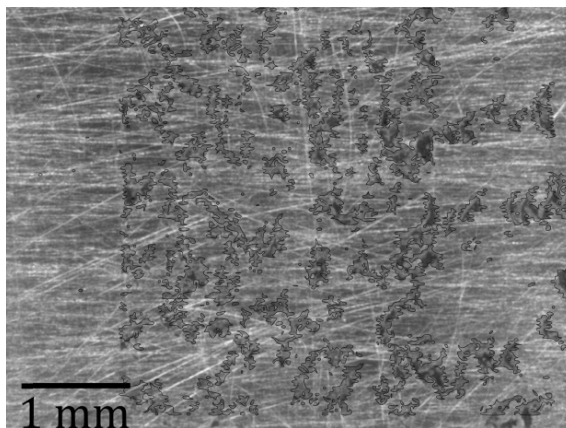


Figure 8 : Image de surface d'échantillon avec superposition de régions de changement de phase à 100 kHz

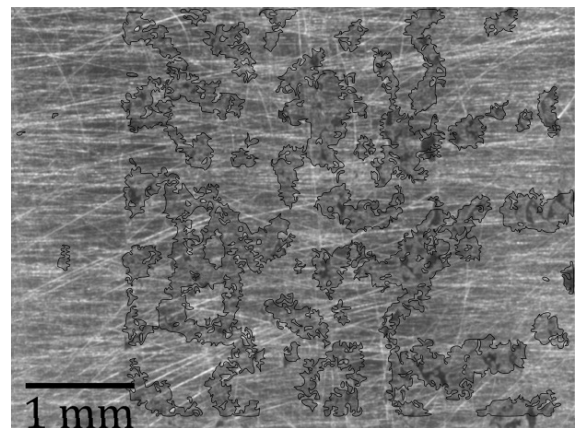


Figure 9 : Image de surface d'échantillon avec superposition de régions de changement de phase à 103 Hz

En relation avec la profondeur d'exploration, il convient de noter l'apparition d'un défaut dans la région la plus dense de l'image de phase à basse fréquence, indiqué par le cercle sur la Figure 6. Contrairement à la majorité de la cartographie, cette variation de phase n'a pas d'équivalent en amplitude et devient moins visible à mesure que la fréquence augmente. En considérant la diffusivité thermique de l'alliage de titane ($2.96 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ [11]), les longueurs de diffusion sont respectivement $l_h = [3, 9, 30, 97] \mu\text{m}$ pour les fréquences $f = [100, 10, 1, 0.1] \text{ kHz}$. Ces valeurs suggèrent la présence d'un défaut à une profondeur comprise entre $30 \mu\text{m}$ et $90 \mu\text{m}$. Pour confirmer qu'il ne s'agit pas d'un artefact superficiel de l'échantillon, une image en lumière visible de la même région de la surface de l'échantillon est présentée en Figure 7. De plus, nous avons extrait les régions de variation de phase des images à 100 kHz et 103 Hz afin de les comparer directement avec l'image en lumière visible. Ces extraits sont présentés sur les Figures 8 et 9. Cette comparaison révèle que la plupart des grandes variations de phase trouvent leur origine dans des défauts superficiels, c'est à dire de pores ouverts. Cependant, une partie des défauts révélés par la variation de phase, même à haute fréquence, restent invisibles lors d'une inspection visuelle de la surface, ce qui laisse penser à la présence de défauts cachés par la surface.

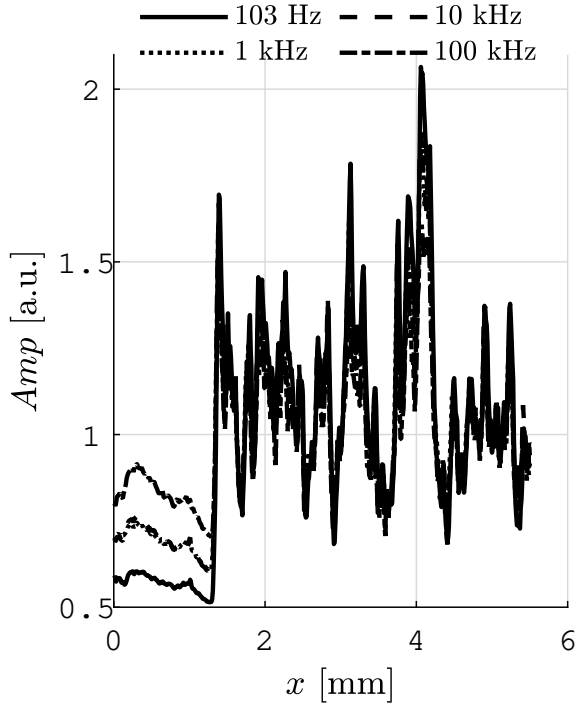


Figure 10 : Amplitude moyenne par colonne pour les différentes fréquences

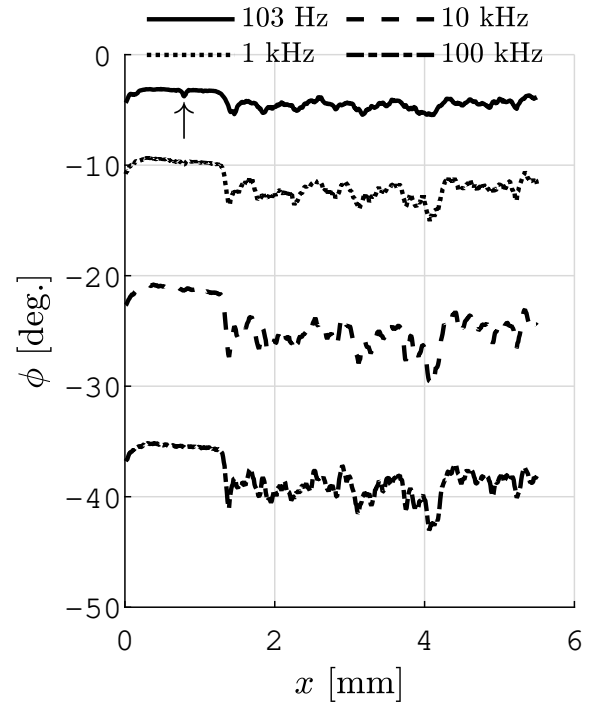


Figure 11 : Phase moyenne par colonne pour les différentes fréquences

Enfin, les Figures 10 et 11 présentent l'amplitude et la phase moyennes par colonne pour chaque fréquence. Ces figures permettent d'identifier les différentes régions de porosité de l'échantillon grâce aux variations des valeurs moyennes, tant pour l'amplitude que pour la phase. Bien que les variations de phase soient plus prononcées à haute fréquence, l'étude à basse fréquence offre une profondeur de sondage plus importante. Une flèche signale la région correspondant au défaut encerclé sur la Figure 6.

Ces résultats mettent en évidence une corrélation entre les variations de l'amplitude moyenne et de la phase moyenne avec la porosité de l'échantillon, ouvrant ainsi des perspectives pour des

applications quantitatives qui seront explorées dans de futurs travaux.

4. Conclusion

Dans ce travail, la méthode RPB a été utilisée pour investiguer les variations de porosité dans un échantillon fabriqué par fusion sur lit de poudre EBM. Les images thermiques en amplitude et en phase, obtenues à différentes fréquences d'exploration, ont permis de distinguer clairement les régions de l'échantillon présentant des variations de porosité résultant des différences de densité énergétique lors de leur fusion.

Les résultats ont montré que les variations de phase, particulièrement à basse fréquence, permettent de détecter des défauts localisés en profondeur, tandis que l'amplitude reste plus sensible aux défauts de surface. De plus, une corrélation a été observée entre les variations de l'amplitude et de la phase moyennes et la porosité, offrant ainsi des perspectives intéressantes pour le développement de méthodes quantitatives.

Ces observations renforcent le potentiel de la RPB comme outil non destructif pour l'analyse des défauts internes et superficiels dans les matériaux métalliques. Dans le futur, des études complémentaires seront nécessaires pour affiner la quantification des défauts et intégrer cette technique dans des processus de contrôle qualité industriels.

Références

- [1] L. Zhou et al. Additive Manufacturing : A Comprehensive Review, *Sensors*, (2024) 24-9, 2668.
- [2] C. Veiga, J. P. Davim & A. J. R. Loureiro, Properties and applications of titanium alloys : a brief review, *Rev. Adv. Mater. Sci*, 32-2 (2012), 133-148.
- [3] M. Tebianian, et al. A Review of the Metal Additive Manufacturing Processes, *Materials*, 16-24 (2023), 7514.
- [4] M. I. Silva et al, Review of conventional and advanced non-destructive testing techniques for detection and characterization of small-scale defects, *Progress in Materials Science*, (2023)138, 101155.
- [5] A. Mateos-Canseco, A. Kusiak, & J. L. Battaglia, Thermal imaging by scanning photothermal radiometry, *Rev. Sci. Instrum.*, 94-10 (2023) 104902.
- [6] P. E. Nordal et S. O. Kanstad, Photothermal radiometry, *Phys. Scr.*, 20-5 (1979) 659-662.
- [7] H. Gong, et al. Defect Morphology in Ti-6Al-4V Parts Fabricated by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting, *24th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, (Août 2013), 440-452.
- [8] A. Bauereiß, T. Scharowsky & C. Körner, Defect generation and propagation mechanism during additive manufacturing by selective beam melting, *J. Mater. Process. Technol.*, 214-11 (2014), 2522-2528.
- [9] Z. C. Cordero, R. B. Dinwiddie, D. Immel & R. R. Dehoff, Nucleation and growth of chimney pores during electron-beam additive manufacturing, *J. Mater. Sci.*, 52 (2017), 3429-3435.
- [10] A. Mateos-Canseco, et al. Thermal characterization of vertical interface by scanning photothermal radiometry, *Rev. Sci. Instrum.*, 95-10 (2024) 104901.
- [11] Strumza, Einat, et al. Thermophysical properties of Ti-6Al-4V fabricated by powder bed fusion methods, *Addit. Manuf.*, 58 (2022), 103045.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à l'Institut Carnot « Énergies du futur » et l'institut Carnot ARTS pour leur soutien financier à ce travail.