

# Développement de l'outil de contrôle in-situ par Courants de Foucault de pièces en cours de Fabrication pour la technique L-PBF

Romain Saddoud<sup>1\*</sup>, Kévy Perlin<sup>1</sup>, Michel Pellat<sup>2</sup>, Natalia Sergeeva-Chollet<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Université Paris-Saclay, CEA, List, F-91120, Palaiseau, France

<sup>2</sup>Université Grenoble Alpes, DTNM, LITEN, CEA, F-38000, Grenoble, France

\*corresponding author, E-mail: romain.saddoud@cea.fr

## Résumé

Le procédé de fabrication additive par fusion laser sur lit de poudre (L-PBF) est couramment utilisé pour la fabrication de pièces métalliques complexes. Pour garantir la qualité des pièces, une surveillance continue pendant le processus de fabrication par un instrument est nécessaire. Les solutions industrielles existantes sont limitées dans la mesure où elles se limitent à la détection d'anomalies dans les paramètres de l'état de la machine ou dans les couches superficielles de la pièce en cours de fabrication. Le contrôle par courants de Foucault est une méthode prometteuse de contrôle non destructif qui pourrait être appliquée pour l'inspection couche par couche du matériau fusionné pendant la fabrication de la pièce. Cette inspection permet de suivre l'évaluation des défauts non seulement à la surface de la dernière couche fusionnée, mais aussi à l'échelle de plusieurs couches fusionnées. Un capteur à courants de Foucault a été développé et adapté pour effectuer des mesures dans une machine L-PBF pendant la phase de fabrication (in-situ). Les performances et le potentiel de la technique en termes d'intégration et d'évaluation des défauts dans la machine ont été étudiés. Les résultats obtenus ont permis d'évaluer les limites de détection en fonction de la largeur et de la hauteur des défauts pendant la fabrication de la pièce. L'influence de la présence de poudre autour de la zone fusionnée a également été étudiée.

## 1. Introduction

Le procédé de fabrication additive par fusion laser sur lit de poudre (L-PBF) est couramment utilisé pour la fabrication de pièces métalliques complexes pour différentes applications telles que l'aéronautique ou les applications médicales par exemple [1,2]. Les pièces métalliques sont produites en fusionnant la poudre métallique couche par couche à l'aide d'un faisceau laser, préservant ainsi la qualité du matériau de base. Cette technique permet donc de fabriquer des pièces à géométrie complexe. La qualité des pièces en termes de propriétés mécaniques peut être influencée par la présence de différents types de défauts dû à de légères différences dans

le processus de fabrication (température, changement local des propriétés de la poudre, vitesse, changement de l'intensité du laser). Si des défauts dépassant la tolérance sont constatés lors du contrôle de la qualité, la pièce doit être rejetée. Afin d'avoir la possibilité de réparer immédiatement après la détection du défaut pour garantir la qualité des pièces, il convient de surveiller le processus au cours de la fabrication. Les solutions existantes (thermographie, diode laser, pyromètre) sont limitées dans le sens où elles se restreignent à la détection d'anomalies dans les paramètres de la machine ou dans les couches superficielles de la pièce en cours de fabrication [3, 4, 5]. Le contrôle par courants de Foucault est une méthode de contrôle non destructive prometteuse qui pourrait être appliquée à l'inspection couche par couche des matériaux fusionnés pendant la fabrication des pièces. Cette inspection est sans contact et permet de suivre l'évaluation des défauts non seulement à la surface de la dernière couche fusionnée, mais aussi à l'échelle de plusieurs couches fusionnées. Des études antérieures ont montré la possibilité d'appliquer cette technique avec des capteurs disponibles dans le commerce [6, 7]. Des capteurs à courants de Foucault basés sur des capteurs magnétorésistifs ont été développés et évalués sur des défauts introduits artificiellement dans un échantillon fabriqué en L-PBF [9]. Dans cette étude, un capteur à courants de Foucault a été développé et adapté pour effectuer des mesures dans une machine L-PBF en cours de fabrication (in-situ). Les performances et le potentiel de la technique en termes d'intégration dans la machine et d'évaluation des défauts couche par couche ont été étudiés. Les résultats obtenus ont permis d'évaluer les limites de détection en fonction de la largeur et de la hauteur des défauts pendant la fabrication de la pièce. L'influence de la présence de la poudre autour de la zone de fusion a également été étudiée.

## 2. Discussion et méthodes

### 2.1. Matériaux et procédés

La configuration de la pièce (CAO) a été réalisée dans le logiciel Solidworks. La pièce présente différentes entailles pour évaluer la détectabilité des défauts pendant la



fabrication de la pièce. Une pièce comportant de longs défauts de différentes largeurs a été conçue afin de s'assurer que le capteur puisse passer dans la zone de défauts. Les limites de détection en fonction de la largeur et de la hauteur des défauts ont été évaluées. Les dimensions de la pièce sont 80 x 40 x 5 mm (10 mm) (longueur x largeur x hauteur de la première marche (hauteur de la deuxième marche)). La pièce a été fabriquée en utilisant de la poudre AlSi7Mg fournie par Toyal FS271 M dans une machine Farsoon L-PBF à l'aide d'un fichier CAO. Les principaux paramètres du processus sont les suivants : puissance du laser = 200 W, vitesse de balayage = 1000 mm/s, épaisseur de la couche = 30 µm. La pièce a été fabriquée sur le plateau de fabrication. La conception de la pièce avec deux niveaux et différents défauts est illustrée sur la figure 1. La demi-coupe de la pièce est présentée pour une meilleure visualisation des défauts à l'intérieur de la pièce. La description des défauts est présentée dans le tableau 1. Les défauts sont caractérisés par leur longueur, leur largeur et leur hauteur.

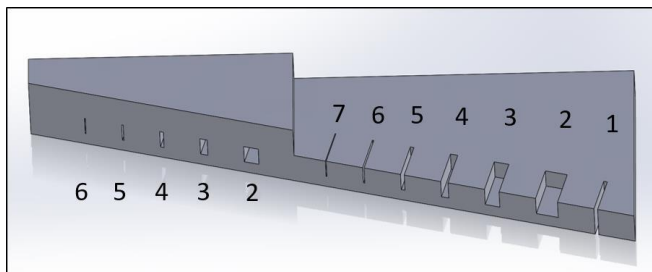


Figure 1 : Coupe de la CAO de la pièce fabriquée

Tableau 1 : Descriptions des défauts

Défaut	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)
1	10	0.5	5
2	10	3	3
3	10	2	3
4	10	1	3
5	10	0.5	3
6	10	0.2	3
7	10	0.1	3

## 2.2. Appareils de mesure

Le capteur sélectionné est composé de deux bobines de 3 mm de diamètre avec recouvrement et fonctionnant en mode émission/réception séparé. La fréquence  $f = 1$  MHz est choisie afin de concentrer les courants de Foucault sur la surface de la pièce testée et d'être moins sensible à la poudre métallique non fusionnée autour de la pièce pendant la fabrication. Le système d'acquisition standard des courants de Foucault d'Eddyfi [10] a été utilisé pour les mesures in situ.

Le capteur a été monté sur le racleur à l'aide d'un support mécanique développé (Fig. 2). Les mesures sont réalisées après la fusion laser lors du retour du racleur. Un codeur à fil a été installé dans la chambre de fabrication. Ce codeur

est connecté au système d'acquisition afin de déterminer le signal du capteur et sa position pendant les acquisitions. Grâce au support mécanique développé, un entrefer constant et maîtrisé de 0,3 mm est maintenu pendant la fabrication de la pièce avec la réalisation des mesures. Les câbles ont été insérés à l'aide d'un support spécifique d'étanchéité conçu et adapté pour assurer l'herméticité de la chambre de fabrication. Le principe d'installation est illustré sur la figure 3.

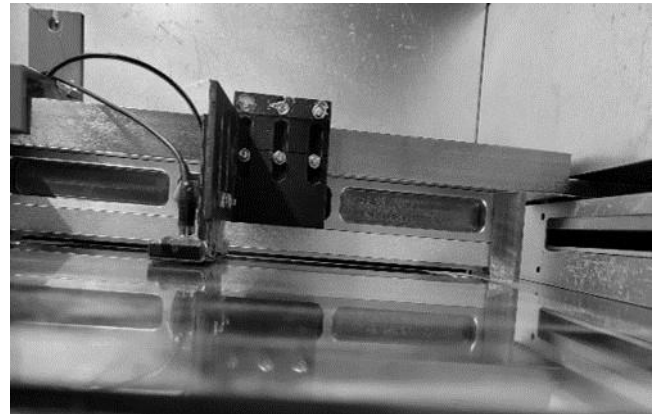


Figure 2 : Support mécanique pour la fixation du capteur courants de Foucault sur la machine Farsoon fixé au racleur

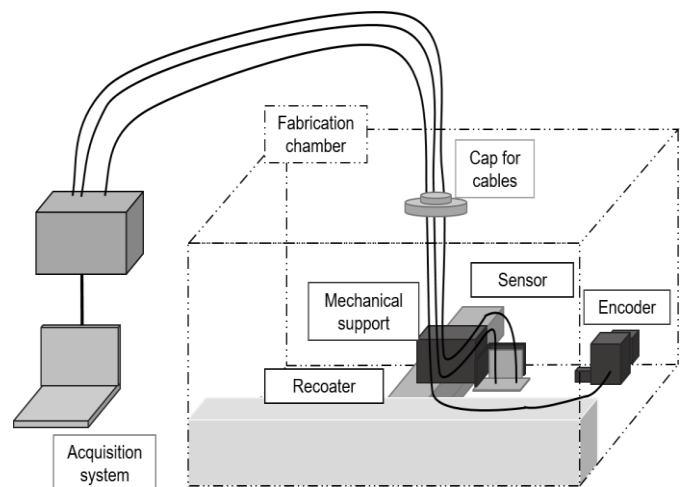


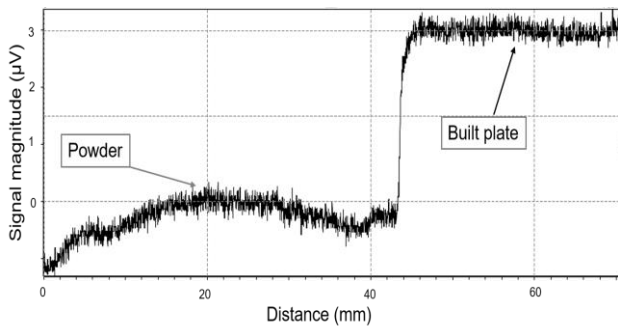
Figure 3 : Installation d'un système à courants de Foucault pour le contrôle in situ

## 3. Discussion et résultats

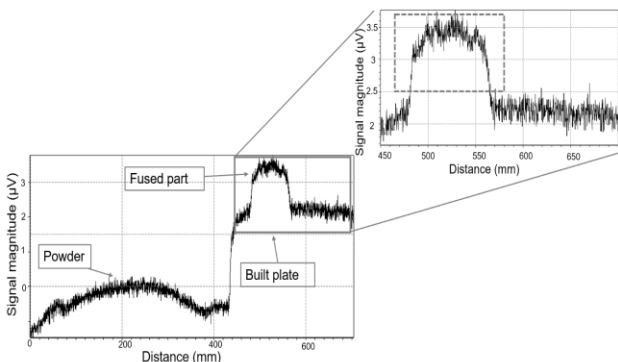
### 3.1. L'influence de la poudre

Pour étudier l'influence de la poudre sur les mesures de la pièce en cours de fabrication, les paramètres décrits ci-dessus ont été utilisés. La fréquence d'excitation est de  $f = 1$  MHz. La tension appliquée est  $V = 8$  V. Tout d'abord, le signal provenant du plateau de fabrication et de la poudre dans le bac de poudre a été mesuré (Fig. 4). La différence entre les deux zones est observée correspondant

à la sensibilité du capteur sur la partie métallique. Les premières couches de poudre d'une hauteur de 30 µm chacune ont été déposées et fusionnées. Ensuite, le signal après le dépôt de 10 couches de la pièce fabriquée a été mesuré sur l'ensemble du parcours du racleur, c'est-à-dire le plateau de construction recouvert de poudre non-fusionnée, de poudre fusionnée et du bac de poudre. La figure 5 montre les résultats de mesures par courants de Foucault en présence de poudre sur le plateau de fabrication, la pièce fusionnée en cours de fabrication et le bac de poudre. La partie en pointillés correspond à la partie fusionnée. On observe qu'il y a toujours une différence entre la signature du signal provenant du bac de poudre et celle provenant du plateau de fabrication recouverte de poudre. Cependant, aucune influence de la présence de poudre métallique à proximité de la pièce fusionnée n'est observée à partir de 10 couches fusionnées. Les extrémités de la pièce en cours de fabrication sont bien distinguées.



**Figure 4 : Résultats expérimentaux obtenus avec le capteur courants de Foucault du signal du plateau de fabrication et du bac de poudre.**

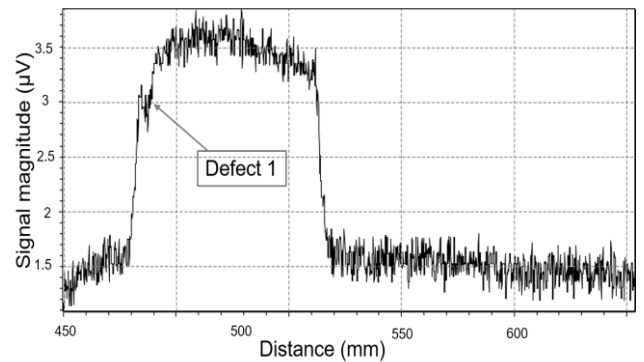


**Figure 5 : Résultats expérimentaux obtenus avec le capteur de courants de Foucault, signal provenant du plateau de fabrication, de la zone fusionnée et du bac de poudre après 10 couches de fusion.**

### 3.2. Détection des défauts

Pour la détection des défauts, les mesures ont été effectuées avec les mêmes paramètres pour le capteur. Les

acquisitions ont été réalisées toutes les 5 couches après le dépôt sur le retour du racleur. Les résultats ont été enregistrés et analysés dans le logiciel Civa [11]. Le défaut 1 a une hauteur de 5 mm, égale à la hauteur de la première marche de la pièce. Après le dépôt et la fusion de 10 couches de poudre, ce défaut n'est pas détecté, mais lors de l'acquisition après 15 couches déposées et fusionnées, il est clairement observé malgré la rugosité de la surface de la pièce (Fig. 6).

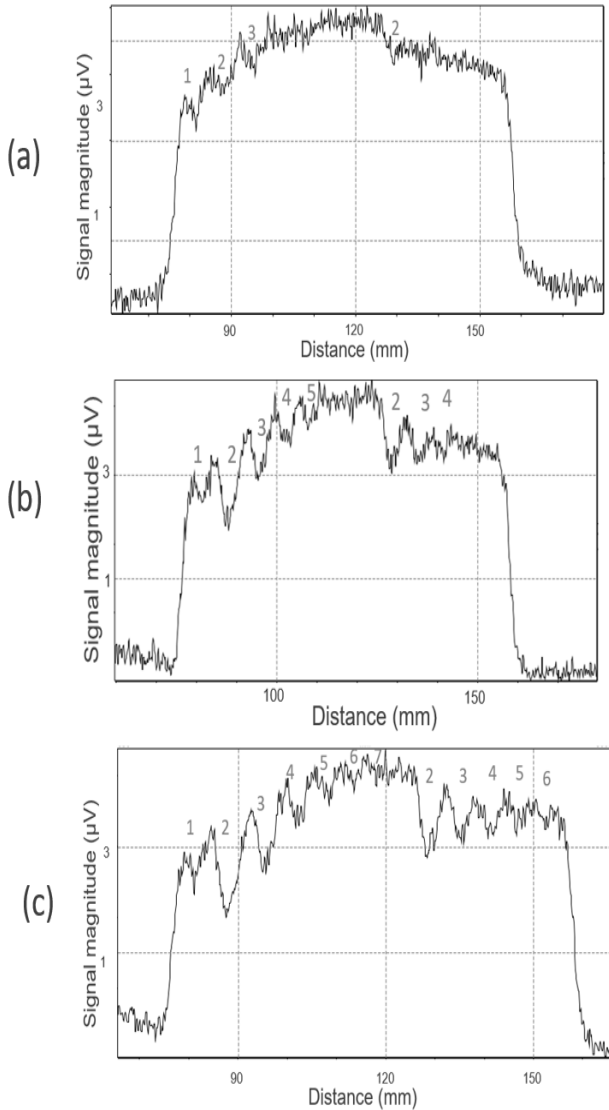


**Figure 6 : Signal courants de Foucault après 15 couches de poudre déposées et fusionnées, détection d'un défaut d'une largeur de 0,5 mm dans la pièce en cours de fabrication**

Les acquisitions pour le contrôle par courants de Foucault sont faites toutes les 5 couches déposées. La formation de défauts devrait commencer à la couche 67, ce nombre de couches déposées correspond à la hauteur de la pièce de 2,0 mm. À partir de cette hauteur, les défauts devraient apparaître dans la pièce fabriquée conformément au fichier CAO. Les mesures ont été effectuées à cette couche, puis après le dépôt et la fusion toutes les 5 couches. La détectabilité en fonction de la largeur et de la hauteur des défauts pendant la fabrication de la pièce est évaluée. A la couche 72, c'est-à-dire à la hauteur de 2,16 mm de la pièce fabriquée, les défauts 2 et 3 d'une largeur de 3 mm et 2 mm et d'une hauteur d'environ 160µm pour ce nombre de couches fusionnées sont détectés en plus du défaut d'une largeur de 0,5 mm avec la hauteur de la pièce fusionnée (Fig. 7 (a)). À partir de la couche 77, le défaut 4 d'une largeur de 1 mm peut être distingué.

Le défaut 4 d'une largeur de 1 mm et le défaut 5 d'une largeur de 0,5 mm peuvent être détectés à partir de 87 couches déposées, ce qui correspond à une hauteur de pièce de 2,6 mm (figure 7 (b)). Cette hauteur correspond à la hauteur du défaut d'environ 0,6 mm.

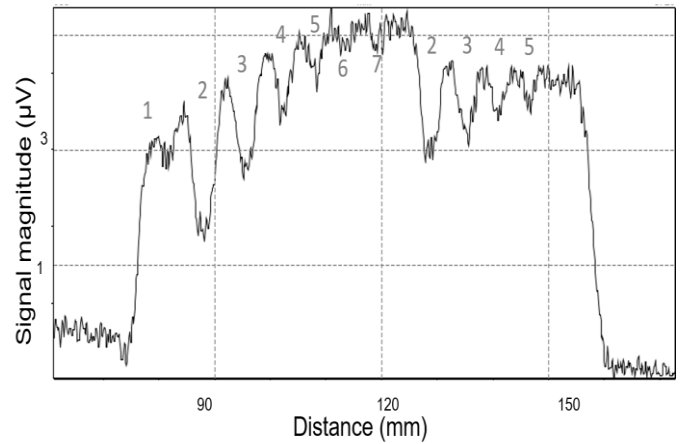
À partir de la couche 97, correspondant à une hauteur de pièce de 2,9 mm, tous les défauts sont détectés (Fig. 7 (c)). Le défaut 7 d'une largeur de 0,1 mm se situe dans les limites de détection pour cette hauteur. On observe que l'amplitude du signal provenant des défauts de hauteur et de largeur plus importantes est plus élevée.



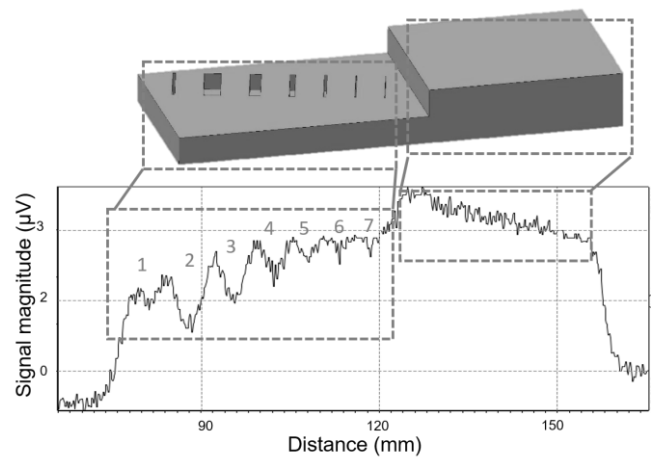
**Figure 7 : Signal courants de Foucault (a) après le dépôt et la fusion de 72 couches de poudre, détection des défauts 1, 2 et 3 d'une largeur de 0,5 mm, 3 mm et 2 mm après 87 couches de poudre déposées et fusionnées, détection des défauts 1, 2, 3, 4 et 5 d'une largeur de 0,5 mm, 3 mm et 2 mm, 1 mm et 0,5 mm (c) après 97 couches de poudre déposées et fusionnées, détection de tous les défauts 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7 d'une largeur de 0,5 mm, 3 mm et 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,2 mm et 0,1 mm dans la pièce en cours de fabrication.**

Après la fabrication de la première marche de la pièce, une couche supplémentaire a été déposée, pour qu'une couche de poudre fusionnée se trouve au-dessus des défauts dans la zone de la deuxième marche. Tous les défauts sont encore détectés (Fig. 8). Néanmoins, après le dépôt et la fusion des 5 couches suivantes, aucune indication des défauts dans la zone de la deuxième marche n'a été observée. La fréquence d'excitation de 1 MHz n'est pas suffisamment basse pour permettre la détection de défauts situés à 180 µm sous la surface dans la zone de fusion.

Cependant, les défauts recouverts par la poudre non fusionnée sont toujours détectés (Fig. 9).



**Figure 8 : Signal courants de Foucault de la pièce fabriquée après la fusion de la première marche, et la déposition et la fusion de 1 couche de la deuxième marche de la pièce (165 couches).**



**Figure 9 : Signal courants de Foucault de la pièce fabriquée après la fusion de la première marche, et la déposition et la fusion de 6 couches de la deuxième marche de la pièce (170 couches).**

### 3.3. Discussion

Cette étude a démontré qu'il n'y a pas d'influence de la poudre autour de la pièce en cours de fabrication sur les mesures de contrôle par courants de Foucault en raison de la conductivité plus faible que la zone fusionnée à la fréquence d'excitation choisie pour le capteur. La même conclusion a été trouvée dans l'étude d'Ehlers et al. avec les capteurs à courants de Foucault basés sur des capteurs magnétorésistifs [9].

Des défauts superficiels d'une largeur de l'ordre de 100 µm peuvent être détectés. Ainsi, le capteur à courants de Foucault développé peut être considéré comme un bon candidat pour la détection des défauts réels susceptibles de se produire au cours de la fabrication par fusion laser sur lit de poudre, étant donné que les défauts, tels que la

porosité ou l'absence de fusion, sont du même ordre de grandeur. La largeur des défauts peut varier légèrement d'une couche à l'autre en raison du fonctionnement de la machine, de sorte que l'estimation de la largeur des défauts peut être distinct à différents moments de la fabrication. La détectabilité des défauts est indiquée dans le tableau 2. La formation des défauts a été suivie en cours de fabrication de la pièce, il est donc possible d'étudier à partir de quelle hauteur minimale les défauts peuvent être détectés. Cette information est obtenue à partir de l'analyse du nombre de couches déposées. Les défauts 1 et 5 ont la même largeur mais sont détectés à des hauteurs différentes. Cela s'explique par le fait que le défaut 1 est un défaut traversant, alors que le défaut 5 est un défaut débouchant, dont la formation commence après la fabrication des 2 premiers mm de la pièce.

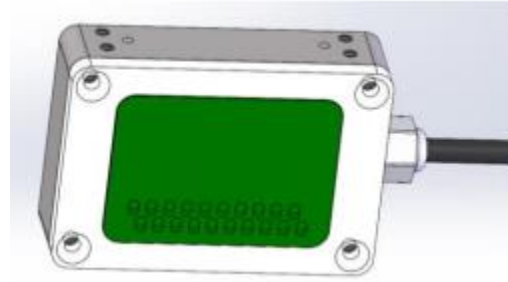
**Tableau 2 : Défauts détectables à partir de leur hauteur minimale**

Défaut	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Hauteur de détection (mm)
1	10	0.5	0.45
2	10	3	0.16
3	10	2	0.16
4	10	1	0.6
5	10	0.5	0.6
6	10	0.2	0.9
7	10	0.1	0.9

Afin d'obtenir des informations sur la position du défaut dans la pièce fabriquée et de définir sa longueur, la cartographie de la zone fusionnée pourrait être réalisée à l'aide d'un capteur multi-éléments courants de Foucault.

### 3.4. Conception et fabrication d'un capteur multi-éléments

L'étude vise à évaluer les performances du capteur multi-éléments par courants de Foucault en terme de détectivité des défauts dans une pièce de fabrication additive pendant le processus de fabrication. L'intérêt d'utiliser un capteur multi-éléments est d'obtenir la cartographie et la position des défauts sur l'ensemble de la pièce. Dans un premier temps, une étude paramétrique par simulation sur le logiciel CIVA a été réalisé afin de déterminer la configuration de motifs pour la réalisation du capteur multiéléments. La dimension sélectionnée pour chaque élément est identique et correspond à la dimension du capteur mono-élément de l'étude. Le capteur a été réalisé par société Statice (Fig 10).



**Figure 10 : CAO du capteur multiélément composé de 20 éléments fabriqué par Statice**

Le capteur multi-éléments présente 20 éléments en quinconce sur deux lignes afin d'éliminer "les zones mortes" de détection. Ce capteur sera prochainement implanté dans la machine Farsoon L-PBF afin d'évaluer les performances de capteur multiéléments.

## 4. Conclusion

Au cours de cette étude, la possibilité de détection in situ à l'aide d'un capteur à courants de Foucault fixé sur le racleur a été évaluée. La pièce en AlSi7Mg a été fabriquée avec des défauts définis dans la CAO de la pièce. La poudre non fusionnée utilisée pour le processus de fusion de lit de poudre n'a pas d'influence sur le contrôle in situ. Nous n'avons pas observé de dégradation du rapport signal/bruit.

L'étude a montré la possibilité de la détection in-situ des défauts de l'ordre de 0,1 mm (largeur). Cependant, la hauteur des défauts joue également un rôle important dans la détection. Les défauts d'une largeur de 3 mm et 2 mm ont été détectés à partir de hauteurs supérieures à 0,16 mm, tandis que les défauts de 0,5 mm ont été détectés à partir de hauteurs supérieures à 0,6 mm. Pour améliorer le contrôle in situ, un capteur multiéléments comportant 20 motifs avec une résolution spatiale suffisante afin de couvrir la surface de la pièce fabriquée sans réduire la vitesse de balayage a été conçu. Prochainement ce capteur sera implanté dans une machine L-PBF afin d'obtenir la cartographie de l'ensemble de la pièce.

## 5. Références

- [1] Wohlers T, Campbell R I; Diegel O, Huff R. Kowen, J, Wohlers report 2020: 3D printing and additive manufacturing state of the industry, Wohlers Associates: Fort Collins, CO, USA, 2020.
- [2] Singamneni, S.; Lv, Y.; Hewitt, A.; Chalk, R.; Thomas, W.; Jordison, D. (2019) Additive manufacturing for the aircraft industry: A review, J. Aeronaut. Aerospace Eng. 8 (1), 215 <https://doi.org/10.35248/2168-9792.19.8.215>
- [3] Everton S, Hirsch M, Stravroulakis P, Leach R et Clare A (2016) Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive

- manufacturing. *Materials & Design*, 95 :431445. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.099>
- [4] Mohr, G.; Altenburg, S.J.; Ulbricht, A.; Heinrich, P.; Baum, D.; Maierhofer, C.; Hilgenberg, K. (2020) In-situ defect detection in laser powder bed fusion by using thermography and optical tomography—comparison to computed tomography. *Metals*, 10, 103. <https://doi.org/10.3390/met10010103>
- [5] Mitchell, J.A.; Ivanoff, T.A.; Dagel, D.; Madison, J.D.; Jared, B. (2020) Linking pyrometry to porosity in additively manufactured metals. *Addit. Manuf.* 31, 100946. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100946>
- [6] Todorov, E.; Boulware, P.; Gaah, K. (2018) Demonstration of array eddy current technology for real-time monitoring of laser powder bed fusion additive manufacturing process. *Proc. SPIE*, 10599, 1059913. <https://doi.org/10.1117/12.2297511>
- [7] Todorov, E.I. Non-destructive Evaluation of Additive Manufacturing Components. U.S. Patent US 2018/0266993 A1, 20 September 2018
- [8] Spurek, M.A.; Luong, V.H.; Spierings, A.B.; Lany, M.; Santi, G.; Revaz, B.; Wegener, K. (2021) Relative density measurement of PBF-manufactured 316L and AlSi10Mg samples via eddy current testing. *Metals*, 11, 1376. <https://doi.org/10.3390/met11091376>
- [9] Ehlers, H.; Pelkner, M.; Thewes, R. (2020) Heterodyne eddy current testing using magnetoresistive sensors for additive manufacturing purposes. *IEEE Sens. J.*, 20,11: 5793-5800. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2973547>
- [10] <https://eddyfi.com>