

## Proposition de sujet de thèse

**Voies d'amélioration pour le procédé de fabrication additive par fusion lit de poudre (LPBF).**

**Analyse physique du procédé et étude des microstructures formées.**

---

**Lieu:** Laboratoire PIMM, UMR 8006 CNRS, Ecole Nationale d'Arts et Métiers, 75013 PARIS

[www.pimm.paris.ensam.fr](http://www.pimm.paris.ensam.fr)

**Durée et rémunération :** 3 ans (Septembre 2022-Aout 2025). Financement CNRS ~1750 €/mois

**Profil Recherché :** Master 2 en énergétique ou sciences des matériaux, ou élève ingénieur, goût prononcé pour l'expérimentation.

### **Candidatures**

Envoyer vos candidatures (CV + lettre de motivation) à : [patrice.peyre@ensam.eu](mailto:patrice.peyre@ensam.eu)

### **Résumé**

Le sujet de thèse proposé vise à tester différentes possibilités d'amélioration du procédé d'impression 3D métallique par fusion laser sur lit de poudre (L-PBF), et à vérifier leurs effets à travers des expériences de fusion laser instrumentées, et des analyses détaillées des états de la matière fabriquée.

### **Contexte**

La fabrication additive de pièces métalliques par fusion sélective lit de poudre (L-PBF) permet une grande diversification dans les catégories de pièces imprimables, et autorise plus de complexité dans les formes géométriques que les procédés conventionnels (fonderie, forge), ouvrant ainsi la voie à une mini-révolution technologique. Sa plus large diffusion industrielle est toutefois limitée par différents aspects parmi lesquels la présence de défauts (porosités ou fissures) dans les pièces fabriquées, les mauvais états de surface ( $R_a > 6-7 \mu\text{m}$ ), et l'instabilité du procédé de fusion qui génère, lors de la fabrication, un grand nombre d'éjections de métal liquide qui polluent les pièces fabriquées et/ou les lits de poudre [1,2,3].

Le développement actuel de petites machines de fabrication additive instrumentées [2] permettant d'étudier et de faire évoluer le procédé à l'échelle des bains de fusion à partir de petits volumes de poudre est particulièrement attractif car il permet de tester différentes voies d'amélioration pour le procédé sans être limité par la lourdeur des moyens de fabrication industriels, et en facilitant l'installation de diagnostics (caméras rapides, caméras thermiques) permettant de comprendre les mécanismes physiques impliqués et l'origine des défauts.

## Descriptif de la thèse

La thèse proposée au sein du laboratoire PIMM dans le cadre du projet ANR NOCOLOX, en collaboration avec l'I2M Bordeaux et le SIMAP-Grenoble peut être décrite en 4 volets distincts.

- Tout d'abord, il s'agira de réaliser une bibliographie de synthèse sur les mécanismes physiques mis en jeu en impression 3D L-PBF (fusion + solidification rapide, instabilités de fusion), les principaux paramètres du procédé et les microstructures de solidification en se focalisant sur les alliages d'aluminium et/ou de titane qui feront l'objet de cette étude.

- Dans un premier volet expérimental, le(la) doctorant(e) réalisera des essais de L-PBF instrumentés (imagerie rapide et thermique des zones fondues à fort facteur de grandissement) sur une mini-enceinte de travail (Fig.1), permettant de réaliser une exploration paramétrique depuis la réalisation de mono-cordons jusqu'à la fabrication de pièces 3D cubiques de petite taille. A travers ces expériences, le(la) doctorant(e) testera l'influence de paramètres procédé innovants comme la forme de l'éclairement laser, le régime temporel (continu ou pulsé) ou le préchauffage du lit de poudre sur la stabilité des zones fondues.

- Le deuxième grand volet expérimental consistera à analyser les cordons de fusion et les pièces fabriquées en termes de géométrie et de microstructure (microscopie optique et électronique, analyse EDS, EBSD, analyse topographique par profilomètre optique, microdureté, diffraction des rayons X), afin d'évaluer les effets des paramètres du procédé, et en particulier ceux de la stratégie de fabrication, et des différentes modifications d'éclairement laser. Les microstructures obtenues seront alors confrontées à des modèles numériques développés en interne, permettant de comprendre l'origine des états métallurgiques à partir des cycles thermiques locaux  $T=f(x, y, z, t)$  vus par la matière. Un accent particulier sera porté à l'analyse des textures cristallographiques et l'évolution de la microstructure après traitement thermique.

L'analyse des conditions de densification de la matière sera approfondie par la mise en œuvre d'essais de tomographie X sur un répliqueur L-PBF au synchrotron (ESRF Grenoble) permettant d'évaluer cordon après cordon, l'évolution de la densité des pièces fabriquées.

- Enfin, il s'agira de transférer les acquis des développements réalisés sur un autre banc instrumenté (installé à l'I2M) et sur une machine semi-industrielle de fabrication additive L-PBF, pour des géométries de pièces plus complexes.

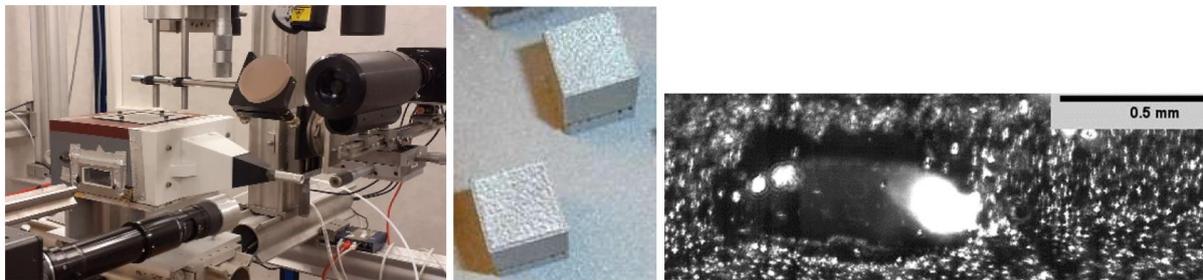


Figure 1 : (a) Mini-machine de fabrication additive L-PBF instrumentée (b) exemples de cubes fabriqués, (c) Imagerie rapide sur zone fondue

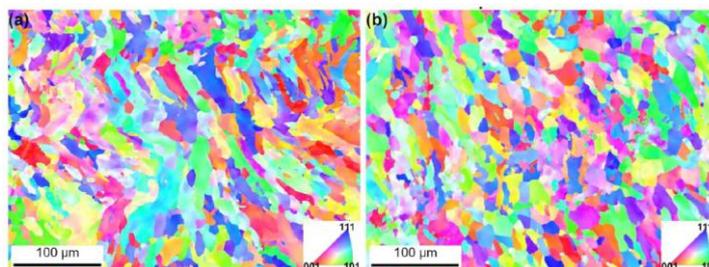


Figure 2 : Influence d'une modification d'éclairage laser sur les microstructures obtenues: (a) faisceau circulaire => structure colonnaire et (b) faisceau elliptique=> structure plus équiaxe (b) [4]

### Localisation

La thèse se déroulera majoritairement dans les locaux du laboratoire PIMM (proche de Place d'Italie, Paris 13<sup>ème</sup>), à l'exception de quelques semaines à l'I2M Bordeaux pour transposer certains développements expérimentaux sur les moyens de l'I2M, et de quelques journées à Grenoble pour des expériences de tomographie X sur réplicateur L-PBF.

### Encadrement

L'encadrement sera assuré au PIMM par Patrice Peyre (Directeur de Recherche CNRS, PIMM), Frédéric Coste (Ingénieur de Recherche CNRS, PIMM) et Cyril Gorny (Ingénieur d'Etude CNRS, PIMM). Un co-encadrement sera assuré par l'I2M.

### Références

[1] V. Gunenthiram, Compréhension de la formation de porosités en fabrication additive (LBM).

Analyse expérimentale de l'interaction laser – lit de poudre – bain liquide, *Thèse*, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2018.

[2] P. Bidare et al. Laser powder bed fusion in high-pressure atmospheres, *The Int. Journal of Adv.Manuf. Techn.* (2018), /[10.1007/s00170-018-2495-7](https://doi.org/10.1007/s00170-018-2495-7)

[3] M.J. Matthews, G. Guss, S.A. Khairallah, A.M. Rubenchik, P.J. Depond, W.E. King, Denudation of metal powder layers in laser powder bed fusion processes, *Acta Materialia*. 114 (2016) 33–42., [10.1016/j.actamat.2016.05.017](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.05.017)

[4] T.T Roehling et al., Controlling grain nucleation and morphology by laser beam shaping in metal additive manufacturing, *Materials & Design*, Volume 195, October 2020, 109071