# Sujet de Thèse de Doctorat

*Fabrication Additive par Laser de Composites à matrice fer*

**Mots Clés**
Fabrication Additive, Laser, microstructures, composites à matrice métallique

**Résumé**
Dans le cadre du développement de matériaux métalliques à hautes performances, les procédés de fabrication additive présentent un avantage certains dans la possibilité d'élaborer directement des géométries complexes tout en assurant de bons états microstructuraux et mécaniques. Dans ce contexte général, l'étude proposée consiste à optimiser la mise en œuvre d'un composite à matrice acier 16NCD13 + renforts céramiques particulaires TiC, par deux techniques laser (fusion de poudre projetée DEDp et fusion lit de poudre LPBF), à étudier et comprendre les microstructures formées, puis à caractériser les propriétés mécaniques résultantes. La thèse se déroulera à la fois au laboratoire PIMM des Arts et Métiers (75013 Paris) et au Centre des Matériaux de l'Ecole des Mines (91100, Corbeil-Essonnes).

**Contexte**
Les procédés de fabrication additive, et en particulier ceux utilisant des lasers ($DED_p$ et LPBF), permettent de repousser les limites en complexité des pièces fabricables, tout en autorisant la mise en œuvre d'une large gamme de matériaux, homogènes ou hétérogènes. Au sein des matériaux multiphasés, les composites à matrice métallique (CMM) et renforts céramiques ont acquis une certaine maturité et présentent un réel intérêt pour les propriétés mécaniques à haute température, la résistance tribologique et les capacités d'allègement entre autres. Les procédés usuels pour fabriquer ces CMM étant encore longs et coûteux (fonderie, Cold & Hot Isostatic Pressing, frittage), les technologies de fabrication additive par laser possèdent un réel intérêt. Si les CMM à matrice aluminium possèdent une certaine maturité [1], ce n'est pas le cas d'autres matrices (base titane, fer) pour lesquelles les choix de renforts particulaires compatibles avec une mise en œuvre sans défaut ne sont pas encore totalement acquis [2, 3]. Or, pour ces familles d'alliages, largement utilisées dans le secteur aéronautique pour leurs propriétés spécifiques, un gain de performances est également attendu pour diverses applications en service.
La technique de projection laser ou *Direct Energy Deposition with powder* ($DED_p$) [4, 5] doit permettre d'élaborer des objets en CMM à gradient de renforts afin d'ajuster les propriétés visées aux diverses parties d'une pièce. Ainsi, on visera un faible taux de renfort dans les zones où une bonne tolérance aux dommages est recherchée et un taux élevé de renfort dans les zones dimensionnées en rigidité (haut module) ou devant résister à l'usure (haute dureté). A contrario, le procédé lit de poudre *Laser Powder Bed Fusion* (LPBF) [5] permet difficilement de générer des pièces à gradients de renforts, mais assurera une complexité géométrique supplémentaire aux CMM par rapport au $DED_p$.

**Objectifs**

Le but du sujet de thèse, mené conjointement au laboratoire PIMM (Arts et Métiers, Paris), et au Centre des Matériaux (Mines, Evry), dans le cadre du GIS HEAD est de pouvoir : (1) élaborer des pièces en composites à matrice métallique 16NCD13 + TiC (CMM) au plus près des côtes, par des procédés additifs (fusion laser sur lit de poudre LPBF et projection laser $DED_p$) avec des taux de renforts variables et/ou des gradients de renfort (facilement réalisables par projection laser), (2) caractériser les microstructures (MEB, MET, EBSD, DRX) des

alliages élaborés en lien avec les conditions d'élaboration, (3) caractériser les propriétés mécaniques à différentes échelles.
Il répond à différents enjeux scientifiques et technologiques parmi lesquels :

- Repousser les limites des taux de renforts acceptables sans fissuration lors de la mise en œuvre des procédés $DED_p$ et L-PBF
- Maîtriser les effets d'un chauffage additionnel permettant de limiter la fissuration [5]
- Assurer une répartition homogène des renforts
- Comprendre les effets microstructuraux associés à la diffusion du carbone dans la matrice (cémentation interne) en cours de procédé, étudier les effets d'interface renforts/matrice, quantifier et analyser l'état de précipitation en fonction du procédé.

Pour répondre à ces objectifs, le projet de thèse est divisé en deux volets. Le premier est centré sur la mise en œuvre instrumentée des procédés ($DED_p$ et LPBF) sur les machines du PIMM et du CMAT et leur optimisation pour la fabrication du CMM 16NCD13/TiC. Le second volet concerne une caractérisation microstructurale et mécanique avancée.

## Localisation et cadre de l'étude

La thèse, réalisée dans le cadre des activités du GIS HEAD sur la fabrication Additive, se déroulera à travers une collaboration entre le laboratoire PIMM (UMR 8006 CNRS) de l'ENSAM (75013, Paris) et le Centre des Matériaux (CMAT) de l'Ecole des Mines de Paris (Evry). Le PIMM apportera son expertise sur la maitrise instrumentée (caméras rapides, thermiques) du procédé LMD et sur les matériaux (analyse EBSD et mesure des contraintes internes par DRX, analyse des microstructures). Le CMAT apportera son expertise sur le procédé L-PBF instrumenté et en caractérisation des matériaux CMMs, notamment en essais de traction in situ au MEB et en analyse au MET.

## Encadrement

| | |
|---|---|
| Direction de thèse : | Patrice PEYRE (DR CNRS, PIMM) |
| Co-direction de thèse : | Christophe COLIN (Enseignant – chercheur, CMAT- Mines) |
| Co-encadrement de thèse : | |
| | Sylvain DEPINOY (Enseignant – chercheur, CMAT- Mines) |
| | Zehoua HAMOUCHE (MCF CNAM, PIMM) |

## Profil du (de la) candidat(e)

Ingénieur et/ou Master Recherche – Bon niveau de culture générale et scientifique. Bon niveau de pratique du français et de l'anglais (niveau B2 ou équivalent minimum). Bonnes capacités d'analyse, de synthèse, d'innovation et de communication. Adaptabilité. Goût pour la Recherche.

**Prérequis (compétences spécifiques pour la thèse) :**
Bonnes connaissances en science des matériaux - métallurgie et en procédés d'élaboration
La connaissance des procédés de fabrication additive par laser est un plus

**Pour postuler :**
Envoyer à : patrice.peyre@ensam.eu,
christophe.colin@minesparis.psl.eu

- Un CV
- Une Lettre de motivation décrivant le projet personnel
- Des relevés de note M1, M2
- Au moins 1 lettre de recommandation, incluant les coordonnées des personnes pouvant être contactée

**Références**

[1] S.T. Mavhungu et al., Aluminum Matrix Composites for Industrial Use: Advances and Trends, *Procedia Manufacturing*, Volume 7, 2017, Pages 178-182

[2] K. Dorhmi, Z. Hamouche et al. Experimental study and micromechanical modelling of the effective elastic properties of Fe-TiB2 composites, *Composite Structures*, 272 (2021), https://doi-org.rp1.ensam.eu/10.1016/j.compstruct.2021.114122

[3] B. Al Mangour et al. In-situ formation of novel TiC-particle-reinforced 316L stainless steel bulk-form composites by selective laser melting, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 706, 5 June 2017, Pages 409-418

[4] S. Pouzet, Thèse Ensam, Fabrication additive de composites à matrice titane par fusion laser de poudre projetée **(2015),** http://www.theses.fr/2015ENAM0051

[5] G. Bidron, A. Doghri, T. Malot, F. Fournier-dit-Chabert, M. Thomas and P. Peyre, Reduction of the hot cracking sensitivity of CM-247LC superalloy processed by laser cladding using induction preheating, *Journal* of *Materials Processing Technology*, 2020, 277, pp.116461, 10.1016/j.jmatprotec.2019.116461