

## Offre de thèse 2024- CEMEF

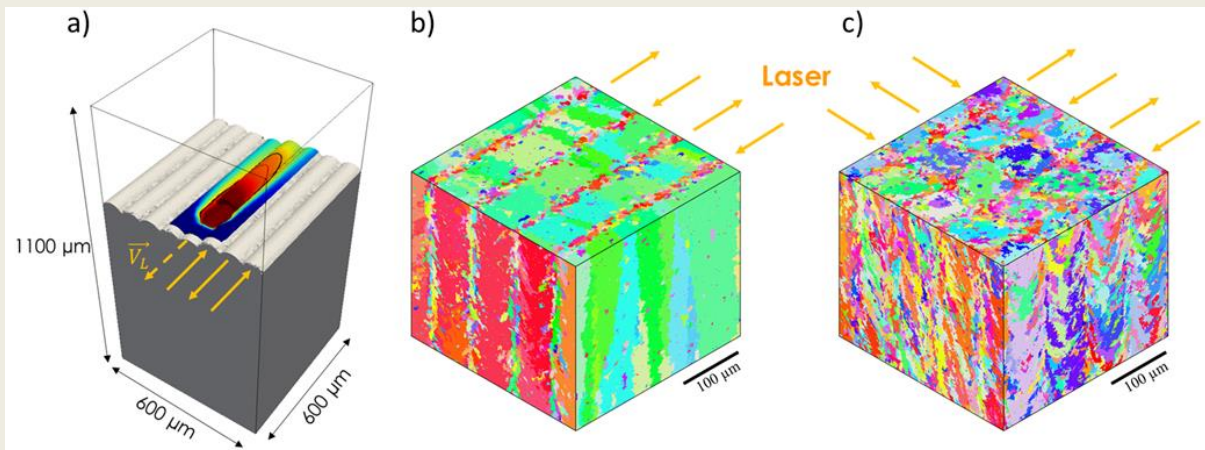
TITRE	<p align="center"><b>Modélisation des procédés de fabrication additive</b>  <b>– Application aux alliages magnétiques à faibles pertes réalisés par feuilletage 3D</b></p>
Acronyme	FALSTAFF
Modalités d'encadrement	<p>Projet de recherche réalisé au sein de l'équipe 2MS (Métallurgie, Mécanique, Structures et Solidification) du CEMEF (Centre de Mise en Forme des Matériaux, Mines Paris, PSL Université). Le doctorant sera encadré par différents permanents chercheurs et enseignants-chercheurs de l'équipe 2MS, et bénéficiera des moyens informatiques du CEMEF, ainsi que de la formation associée.</p>
Objectif général	<p>Modélisation thermohydraulique et microstructurale des procédés de fabrication additive poudre appliqués aux alliages d'intérêts magnétiques, Fer-Silicium et Fer-Cobalt-Vanadium, dans le cadre du projet ANR FALSTAFF (Fabrication additive d'alliages magnétiques à faibles pertes par feuilletage 3D) regroupant les partenaires académiques Roberval (laboratoire de l'Université de Technologie de Compiègne) et ICB-LERMPS (laboratoire de l'Université de Technologie de Belfort Montbéliard), le LITEN (laboratoire du Commissariat à l'Energie Atomique) et les industriels APERAM et ALSTOM.</p>
Contexte	<p>La fabrication additive (FA) a conduit à une révolution dans la conception mécanique en autorisant la réalisation de pièces de formes complexes et de géométries originales. Cependant, dans le domaine des machines électriques, la FA reste peu développée. Les études sont, cependant, poussées par la demande de machine de conversion d'énergie mécanique-électrique, notamment dans le cadre des véhicules électriques, avec le souhait de disposer d'une forte puissance massique, associée à de faibles pertes. Ainsi, une machine électrique est composée de différents sous-systèmes sur lesquels les technologies de FA apporteraient des innovations décisives. Le circuit magnétique est un composant d'intérêt, notamment le stator (partie fixe) composé d'éléments ferromagnétiques, actuellement conçu à travers un empilement de tôles laminées isolées. Le projet ANR FALSTAFF vise à explorer de nouvelles voies de réalisation de ces éléments, en se libérant des contraintes de géométries actuelles, tout en préservant les propriétés des composants, notamment en termes de rendement magnétique.</p> <p>Le projet FALSTAFF se propose d'explorer de nouvelles voies innovantes d'élaboration d'alliages ferromagnétiques, sous forme de composants feuilletés 3D, combinant structures magnétiques et isolantes. Deux méthodes seront proposées : par le développement de porosité interne ou par la combinaison de deux matériaux, et à travers l'exploitation, respectivement, des procédés FLLP (Fusion Laser sur Lit de Poudre) et DMD (Dépôt de Métal Direct). De même, deux matériaux doivent être étudiés dans le cadre de la construction des pièces visées, les alliages fer-silicium et fer-cobalt-vanadium. Des pièces tests feuilletées seront réalisées, en explorant différentes paramétries et stratégies de construction, et en intégrant les traitements thermiques nécessaires. Les pièces produites seront ensuite caractérisées, afin d'analyser le lien entre paramétrie procédé et propriétés microstructurales, chimiques et mécaniques, dans le but de rechercher les conditions de réalisations optimales. A terme le projet vise ainsi à démontrer l'intérêt industriel de la réalisation par procédé FA de composants ferromagnétiques.</p>

Le sujet proposé par le CEMEF vise à développer une modélisation thermohydraulique des procédés de réalisation FA étudiés, aux échelles d'intérêt, couplée à une approche Automates Cellulaires – Eléments Finis (CAFE) permettant, à terme, l'étude du développement des structures de grains en cours de construction et des textures résultantes.

Présentation  
détaillée

Le CEMEF a développé, ces dernières années, différents outils de modélisation numérique des procédés de fabrication additive. Il s'est attaché ainsi à proposer des modèles pertinents permettant autant de suivre le dépôt de cordons de matière isolés, à l'échelle mésoscopique, que la réalisation de pièces de grandes dimensions à l'échelle macroscopique [1,2]. Dans le cadre de ces travaux, des outils de modélisation thermomécanique et microstructuraux sont déjà accessibles, permettant une prédiction des structures de grain à des échelles pertinentes pour explorer l'influence des paramètres de construction (puissance, vitesse des sources de chaleurs ...) ou des conditions de scans (trajectoire ...) comme illustré sur la figure dans le cadre du procédé FLLP. Ces méthodes s'appuient sur le couplage entre deux approches de résolution. L'une, basée sur la méthode élément-finis, s'attache à résoudre les équations de conservation de la chaleur dans le système (évolution thermique), et du moment dans le bain liquide (prédiction des écoulements). L'autre, basée sur l'approche automates cellulaires, s'appuyant sur une grille régulière de cellules, permet le suivi des évolutions microstructurales (germination, croissance et capture des grains formés). L'activité réalisée dans FALSTAFF bénéficiera ainsi de ces outils et méthodes numériques et, plus généralement, de l'ensemble des connaissances et compétences acquises par le CEMEF dans ce domaine.

Plus précisément, le projet de doctorat proposé vise à développer une modélisation fiable des évolutions microstructurales dans les procédés FLLP et DMD, en lien avec les stratégies de construction visées, et sur les alliages magnétiques exploités. Des stratégies de dépôts complexes multicouches, comparables aux expérimentations, seront étudiées, avec l'introduction de couches isolantes (FLLP – Stratégie 1) ou par la réalisation de feuilletage bi-matériaux (DMD – Stratégie 2) pour les 2 alliages d'intérêt. Les effets de puissance, vitesse et trajectoire de laser sur l'orientation et la morphologie des microstructures seront analysés, après validation expérimentale des outils de simulation développés. En complément, les effets de composition et les transformations métallurgiques en cours de refroidissement seront investigués avec l'outil PhysalurgY [3] basé sur le couplage avec le logiciel Thermo-Calc. Des constructions de complexité croissante (monocordon, voiles, cubes ...) seront réalisées par l'ICB-LERMPS et le LITEN et caractérisées en termes de tailles et orientations des grains, par Roberval. Ces données expérimentales seront directement exploitées par le CEMEF pour valider les développements numériques. Cette modélisation déterminera la texture et les orientations des populations de grains, la nature des phases formées et visera, à terme, à estimer les propriétés magnétiques et mécaniques d'usage. Les stratégies d'élaboration optimales seront ensuite investiguées aux échelles : mésoscopique, en étudiant la stabilité de la zone fondue limitant les défauts des dépôts, et macroscopique pour suivre les évolutions structurales à l'échelle des pièces visées. En s'appuyant sur les outils numériques fiables développés, on analysera l'influence des propriétés des matériaux et des paramètres procédés sur les propriétés finales des pièces et la survenue de défauts de fabrication [5].



Simulation du procédé de fabrication additive FLLP par a) une stratégie de translation du champ thermique stationnaire et structures de solidification associées à b) une trajectoire aller-retour sans modification des directions de parcours et c) trajectoire avec rotation de 90° des directions de parcours entre couches consécutives [4].

L'intégralité des développements numériques réalisés enrichiront la librairie de calcul collaborative du CEMEF, Cimlib (C++). Le/la doctorant(e) recruté(e) bénéficiera ainsi, en contrepartie, des développements proposés dans cet outil par les autres utilisateurs (méthode de remaillage, résolution numérique, approche parallélisée ...). Le/la doctorant(e) recevra une formation et développera ses compétences dans le domaine de la science des matériaux, de la mécanique numérique et des transferts d'énergie et de quantité de mouvement. En complément, il/elle recevra une formation poussée dans le domaine du calcul scientifique et de la programmation, notamment pour maîtriser les outils informatiques du CEMEF.

Réf.  
Bibliographiques

- [1] A. Queva, Simulation numérique multiphysique du procédé de fusion laser de lit de poudre - Application aux alliages métalliques d'intérêt aéronautique, Doctorat MINES ParisTech, CEMEF, 2021
- [2] Y. Zhang, G. Guillemot, M. Bernacki, M. Bellet, Macroscopic thermal finite element modeling of additive metal manufacturing by selective laser melting process, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 331 (2018), 514-535
- [3] Physalurgy, bibliothèque de calcul CEMEF, <https://physalurgy.cemef.mines-paristech.fr/>
- [4] T. Camus, D. Maisonnette, O. Baulin, O. Senninger, G. Guillemot, Ch.-A. Gandin, Three-Dimensional Modeling of Solidification Grain Structures Generated by Laser Powder Bed Fusion, *Acta Materialia*, soumis
- [5] C. Xue, N. Blanc, F. Soulié, C. Bordreuil, F. Deschaux-Beaume, G. Guillemot, M. Bellet, Ch.-A. Gandin, Structure and texture simulations in fusion welding processes – comparison with experimental data, *Materialia* (2021), 101305

Valorisation

Communication dans les congrès nationaux et internationaux  
Publication dans les journaux scientifiques du domaine

Outils

Librairies éléments finis CIMLIB, automate cellulaire, suivi des transformations métallurgiques (librairie PY), clusters de calculs et formations associées

Mots-clé

Fabrication Additive, Solidification, Microstructure, Modélisation thermohydraulique et CAFE

Profil & compétences	Formation Ingénieur ou Master 2, dans les domaines des matériaux, de la mécanique ou des mathématiques appliquées. Etudiant(e) attiré(e) par les problématiques liées à la modélisation et la simulation numérique des phénomènes physiques, en science de l'ingénieur.
Salaire brut annuel	28,5k€
Lieu	CEMEF, Sophia Antipolis (Site de Mines Paris - PSL)
Equipe CEMEF	Métallurgie, Mécanique, Structures et Solidification – 2MS
Encadrant / Dir. de thèse	Charles-André GANDIN ( <a href="mailto:charles-andre.gandin@minesparis.psl.eu">charles-andre.gandin@minesparis.psl.eu</a> ) Gildas GUILLEMOT ( <a href="mailto:gildas.guillemot@minesparis.psl.eu">gildas.guillemot@minesparis.psl.eu</a> )

**Pour postuler :** Le dépôt de votre candidature se fait en ligne uniquement en remplissant le formulaire CEMEF en ligne sur : <https://applyfor.cemef.mines-paristech.fr/phd/>