

Offre de Thèse 2025 - CEMEF

TITRE	<p align="center">Projet μstructure-control</p> <p><i>Maitrise de la fabrication de pièces monocristallines par procédé LPBF : modélisation de la croissance microstructurale par couplage automate cellulaire-éléments finis sur des volumes millimétriques</i></p>
Acronyme	<i>μstructure-control</i>
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 numériques et informatiques du CEMEF, ainsi que de la formation associée, pour développer son activité.</p>
Objectif général	<p>Modélisation thermo-hydraulique et microstructurale du procédé LPBF, appliquée aux superalliages base-nickel, dans l'objectif de développer des pièces à structure monocristalline, en réponse aux besoins aéronautiques du partenaire industriel Safran.</p> <p>Trois thèses sont lancées parallèlement au CEMEF (Mines Paris PSL), au PIMM (ENSAM) et à l'institut Pprime (ISAE-ENSMA), supervisées et financées par SAMC (Safran Additive Manufacturing), visant à maîtriser les procédés de fabrication additive poudre LPBF, pour la construction de pièces à microstructure contrôlée, par des voies combinant approches expérimentales et numériques.</p>
Contexte	<p>L'industrie aéronautique s'implique aujourd'hui fortement dans le développement des technologies de fabrication additive (FA). Les possibilités offertes par ces procédés, notamment le procédé Laser Powder Bed Fusion (LPBF - Fusion Laser sur Lit de Poudre) les rendent capables d'accompagner la mise en place de nouvelles typologies de pièces et technologies pour les moteurs futurs, particulièrement en termes de conception et d'adaptation des propriétés locales des matériaux, selon les sollicitations envisagées dans les différentes zones des pièces.</p> <p>Les pièces monocristallines en superalliages base Nickel, présentes dans les parties les plus chaudes de la turbine, figurent parmi les plus complexes et coûteuses d'un moteur. L'intérêt industriel de pouvoir les fabriquer en FA est donc fort. En effet, le procédé actuel par fonderie à cire perdue est efficace et possède une réelle maturité mais reste complexe à industrialiser du au nombre d'opérations nécessaires. Ces dernières amènent à des risques de rebuts importants et des limitations en termes de géométries ou de dimensions des canaux de refroidissement internes. La FA par L-PBF est, de ce point de vue, une opportunité car justement adaptée à ces géométries complexes. On peut également noter un gain attendu en fatigue tout en conservant les propriétés en fluage propres aux monocristaux.</p>

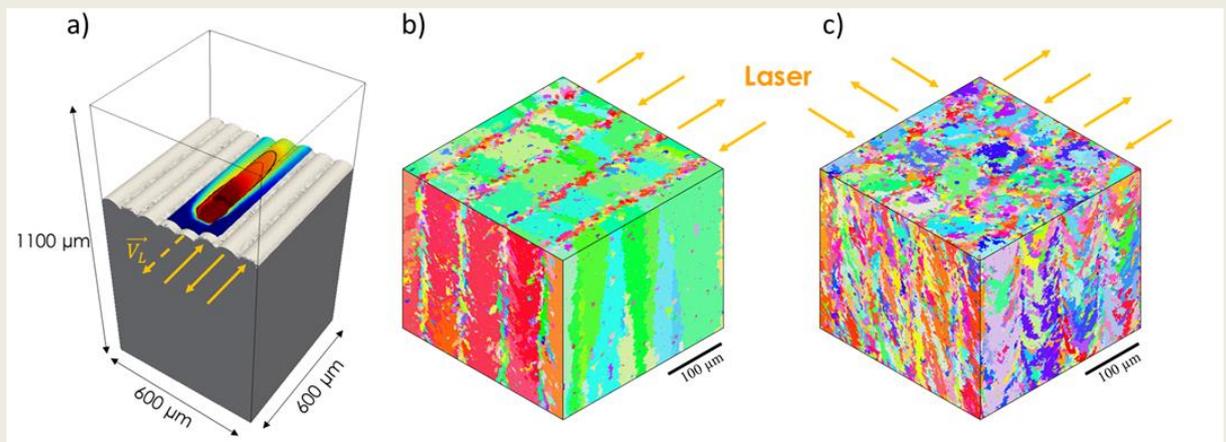
Néanmoins, la maîtrise de la microstructure formée en L-PBF est directement associée à celle de la thermique à l'échelle du bain de fusion, et donc à celui de sa forme, ce qui demeure une difficulté. Cela demande une bonne compréhension et une maîtrise d'un ensemble de leviers avancés du procédé. Le projet visant à proposer des méthodologies de construction innovantes et des modèles de simulation efficaces du procédé LPBF, aux échelles d'intérêt, pour amener à une meilleure compréhension de la sélection des directions de croissance des grains, ceci à travers une interaction forte entre développements numériques et expérimentaux.

Plus spécifiquement, le projet de thèse décrit ici, exclusivement numérique, correspond au développement d'outils de modélisation par approche couplée Automates Cellulaires-Eléments Finis (CA-FE), destinés à la prédiction des microstructures finales observées après solidification dans les pièces aéronautiques pour le partenaire industriel. Il doit permettre, à terme, de proposer des stratégies de construction pertinentes, au regard des besoins industriels actuels et futurs de pièces en superalliages base-nickel à microstructure contrôlée.

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 plus grandes dimensions à l'échelle macroscopique [1-5]. Dans le cadre de ces travaux, des outils de modélisation thermomécanique et microstructuraux sont déjà accessibles, permettant une prédiction des structures de grain couvrant différentes échelles de réalisation, et offrant l'opportunité d'explorer l'influence des paramètres de construction (puissance, vitesse des sources de chaleurs ...) ou des conditions de scans (trajectoire ...) comme illustré en Fig. 1 en LPBF. Ces méthodes se basent sur le couplage entre deux méthodes de résolution. L'une, s'appuyant sur la méthode élément-finis (FE), 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 (CA), utilise une grille régulière de cellules, et permet le suivi des évolutions microstructurales (germination, croissance et capture des grains formés). Pour travailler à construire des pièces associées au dépôt de plusieurs dizaines de cordons, une méthodologie hybride [2,4], également illustrée en Fig. 1, a été proposée plus récemment, consistant à translater le champ thermique stationnaire le long du trajet de construction visé. L'activité réalisée dans le projet actuel 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.

Le projet de doctorat proposé vise à développer une modélisation fiable du procédé LPBF appliqué aux alliages d'intérêt aéronautique, pour étudier l'évolution microstructurale des pièces en cours de construction. Il s'agira d'étudier l'influence des paramètres procédés sur ces évolutions microstructurales et de définir les conditions de constructions pertinentes permettant de réaliser des pièces monocristallines, et – plus largement – à microstructure contrôlée. En particulier, dans le cadre du consortium du projet, deux autres thèses se dérouleront chez les autres partenaires. L'une sera à dominante numérique, pour étudier le développement du bain de fusion, à travers un modèle fin en temps et en espace, permettant d'étudier l'interaction laser-matière. L'autre sera à dominante expérimentale pour étudier la mise en forme du faisceau laser, qui devrait être une clé pour maîtriser la géométrie et la forme du bain, et – en conséquence – les directions de croissance privilégiées et le type de microstructure formée. Une interaction très forte avec ces deux autres thèses est attendue sur la durée du projet. En particulier, il est attendu de pouvoir exploiter au mieux les modèles de forme de faisceau pertinente pouvant conduire à des bains amenant à des constructions monocristallines.



Simulation des structures de solidification en fabrication additive FLLP a) par translation du champ thermique stationnaire, résultant de b) trajectoires 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 (C++). Le/la doctorant(e) recruté(e) bénéficiera ainsi, en contrepartie, des développements réalisés 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.

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, T. Camus, O. Senninger, M. Bellet, C.-A. Gandin, Part-Scale Thermomechanical and Grain Structure Modeling for Additive Manufacturing: Status and Perspectives. *Metals* 14 (2024) 1173
- [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, *Materialia* (2023) 101804
- [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 (Fusalurgy), automate cellulaire, suivi des transformations métallurgiques (librairie Physalurgy - PY), clusters de calculs et formations associées
Mots-clé	Aéronautique, Fabrication Additive, Solidification, Microstructure, Modélisation thermo-hydraulique, Superalliages base nickel
Profil & compétences	Formation Ingénieur ou Master 2, dans les domaines du numérique, 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.
Lieu	CEMEF, Sophia Antipolis (Site de Mines Paris - PSL)
Equipe CEMEF	Métallurgie, Mécanique, Structures et Solidification – 2MS
Encadrant / Dir. de thèse	Charles-André GANDIN (charles-andre.gandin@minesparis.psl.eu) Gildas GUILLEMOT (gildas.guillemot@minesparis.psl.eu) François PICHOT (francois.pichot@safrangroup.com) Paul MARTIN (paul.martin@safrangroup.com)

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>