

TITRE	<b>Caractérisation et contrôlabilité des composants développés par procédé WLAM : Modélisation multiphysique du procédé et des évolutions microstructurales des pièces élaborées</b>
Acronyme	COLUMBO
Modalités d'encadrement	Projet de recherche réalisé dans le cadre de l'équipe 2MS (Métallurgie, Mécanique, Structures et Solidification) du CEMEF (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
Objectif général	Modélisation numérique du procédé WLAM dans le cadre du projet ANR COLUMBO, incluant des approches thermomécaniques et microstructurales à l'échelle du VER nourrissant des analyses CND
Contexte	Le projet ANR COLUMBO regroupe cinq partenaires académiques (CEMEF, CEA LIST, MssMAT, ICMMO et LURPA). Il vise à développer la contrôlabilité du procédé WLAM (Wire and Laser Additive Manufacturing). Ce procédé de fabrication additive est basé sur la fusion d'un fil d'apport métallique par l'intermédiaire d'une source laser. Il permet de réaliser des dépôts de matière de qualité, dans des conditions régulées en termes de source d'énergie et de vitesse d'apport. Cependant les conditions opératoires amènent à des évolutions thermomécaniques marquées (gradient de température, contraintes ...). La microstructure résultante des champs de température est ainsi fortement texturée et anisotrope. De plus, les surfaces des pièces sont marquées par une rugosité importante. Les analyses CND (Contrôle Non Destructifs) des composants en sont affectées en raison de phénomènes d'atténuation et de dispersion ultrasonore. Le projet COLUMBO ambitionne ainsi de proposer, à terme, des méthodes de contrôlabilité des pièces en cours d'élaboration, basée sur une connaissance approfondie et une maîtrise du développement des microstructures formées en cours de procédé.
Présentation détaillée	<p>Le CEMEF a développé, ces dernières années, différents outils de modélisation numérique des procédés de fabrication additive. Le premier est dédié à l'échelle des dépôts incrémentaux de la matière formant les cordons comme présenté à la figure a). Ce modèle résout un problème thermohydraulique avec interface libre. Il peut être appliqué à quelques millimètres de cordons dans des stratégies de dépôts variables [1,2]. Le pendant de ce modèle à l'échelle de la pièce est illustré en figure c). Il se concentre sur l'évolution thermomécanique en cours de fabrication [4]. Finalement, le VER de la structure de solidification montré à la figure b) peut être déduit par couplage avec les calculs précédents. Les méthodes numériques utilisées dans la modélisation de ces procédés sont les éléments finis (résolution thermomécanique), les automates cellulaires (structure de grains) et l'approche level set (suivi de l'interface libre métal - gaz).</p>  <p>The figure consists of three sub-figures labeled a), b), and c).  a) A 3D simulation of a WAAM (Wire and Laser Additive Manufacturing) cord. It shows a laser torch depositing a metal wire onto a substrate. A color scale on the right indicates temperature in degrees Celsius, ranging from 0 to 2500. The cord is shown in a cross-section, with the laser head positioned above it.  b) A 3D simulation of the microstructure of a Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) part. It shows a textured, anisotropic structure with a color scale on the right indicating temperature in degrees Celsius, ranging from 80 to 400. The structure is shown in a cross-section, with a 100 µm scale bar and crystallographic directions [001], [011], and [111] indicated.  c) A 3D simulation of the thermal evolution of a complete part. It shows a propeller-like part on a square base. A color scale on the right indicates temperature in degrees Celsius, ranging from 80 to 400. The part is shown in a perspective view, with a 100 µm scale bar.</p> <p>Figure : Simulation du procédé de fabrication additive, plus particulièrement a) d'un cordon WAAM [Doct. L. Ravix, Projet MACCADAM], b) d'une microstructure LPBF et de sa texture [3]; c) de la thermique d'une pièce complète [4].</p> <p>Le projet proposé s'appuie ainsi sur les méthodes et outils actuellement accessibles au CEMEF, qui seront adaptés au procédé WLAM. Il s'agira de développer une prédiction fiable des évolutions thermomécaniques à différentes échelles de construction. On s'attachera à appliquer, ensuite, le module de prédiction des évolutions microstructurales des pièces. Les structures développées seront, par la suite, diffusées aux partenaires du projet, en tant que matériaux virtuels, pour l'analyse de la</p>

	<p>propagation d'ondes ultrasonores, dans le but d'étudier la fiabilité des méthodes d'analyses CND. Pour remplir ces objectifs, on pourra être amené à considérer les modèles de cinétique de croissance dendritique et le comportement mécanique du matériau. L'ensemble des informations apportées par la modélisation devra permettre d'étudier la survenue potentielle de défauts en cours de construction, afin de permettre aux outils de modélisation d'aider à la construction de pièces saines.</p> <p>Les données expérimentales seront apportées par les autres partenaires de COLUMBO, avec lesquels des échanges réguliers seront réalisés sur l'avancée générale du projet. Ces données serviront à calibrer les modèles proposés par le CEMEF. A terme, il s'agira d'analyser l'influence des propriétés physiques des matériaux et des paramètres procédés sur les propriétés finales du cordon (géométrie, taille, microstructure, déformation, ...) et les défauts de fabrication.</p> <p>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 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 du CEMEF.</p>
<b>Réf. Bibliographiques</b>	<p>[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</p> <p>[2] 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, <i>Materialia</i> (2021), 101305</p> <p>[3] T. Camus, Modelling of microstructures development in laser powder bed fusion process - Application on an IN718 nickel-base superalloy, European Congress And Exhibition On Advanced Materials And Processes – EUROMAT 2021</p> <p>[4] Y. Zhang, G. Guillemot, M. Bernacki, M. Bellet, Macroscopic thermal finite element modeling of additive metal manufacturing by selective laser melting process, <i>Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering</i> 331 (2018), 514-535</p>
<b>Valorisation</b>	<p>Communication dans les congrès nationaux et internationaux Publication dans les journaux scientifiques du domaine</p>
<b>Outils</b>	<p>Librairies éléments finis, automate cellulaire, suivi des transformations métallurgiques (librairie PY) Clusters de calculs et formations associées</p>
<b>Mots-clé</b>	<p>WLAM, Fabrication Additive, Solidification, Microstructure, Modélisation thermomécanique, Modélisation CAFE, Méthode CND</p>
<b>Profil &amp; compétences</b>	<p>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.</p>
<b>Lieu</b>	<p>CEMEF, Sophia Antipolis (Site de Mines Paris)</p>
<b>Equipe CEMEF</b>	<p>Métallurgie, Mécanique, Structures et Solidification – 2MS</p>
<b>Encadrant / Dir. de thèse</b>	<p>Charles-André GANDIN (charles-andre.gandin@minesparis.psl.eu) Michel BELLET (michel.bellet@minesparis.psl.eu) Gildas GUILLEMOT (gildas.guillemot@minesparis.psl.eu)</p>

## TITLE

**Multiscale characterization and controllability by laser ultrasounds of WLAM components: towards a physics-based and ML enhanced online monitoring**

## Project

COLUMBO

## Global objective

Numerical modelling of the WLAM process in the framework of the ANR Project COLUMBO, including thermo-mechanical and microstructural methods at the REV scale in order to enhance CND analysis.

## Context

The ANR project COLUMBO gathers five academic partners (CEMEF, CEA LIST, MssMAT, ICMMO and LURPA). It aims to develop the controllability of the WLAM (Wire and Laser Additive Manufacturing) process. This additive manufacturing process is based on the fusion of a metal filler wire via a laser source. It makes it possible to develop material deposition of quality, under controlled conditions in terms of energy source and added material rate. However, the operating conditions lead to marked thermomechanical changes (temperature gradient, stresses, ...). The resulting microstructure is thus highly textured and anisotropic. In addition, the surfaces of the parts are marked by significant roughness. The NDT (Non-Destructive Testing) analyzes of the components are consequently affected by phenomena of attenuation and ultrasonic dispersion. The COLUMBO project thus aims to propose – at the end - methods for controlling parts during manufacturing process, based on an in-depth knowledge and associated control of the solidification microstructures formed during the process.

## Detailed presentation

CEMEF has developed, in recent years, various tools for numerical modeling of additive manufacturing processes. The first is dedicated to investigate the scale of the incremental deposition of metallic material to develop the beads as presented in figure a). This model solves a thermohydraulic problem with a free interface. It can be applied to a few millimeters of bead in variable deposition strategies [1,2]. The counterpart to this piece-scale model is shown in figure c). It focuses on the thermomechanical evolution during manufacturing [4]. Finally, the REV of the solidification structure shown in figure b) can be deduced by developing coupling with the previous strategies. The numerical methods used in the modeling of these processes are finite elements (thermo-mechanical resolution), cellular automata (grain structure) and level set approach (monitoring of the free metal-gas interface).

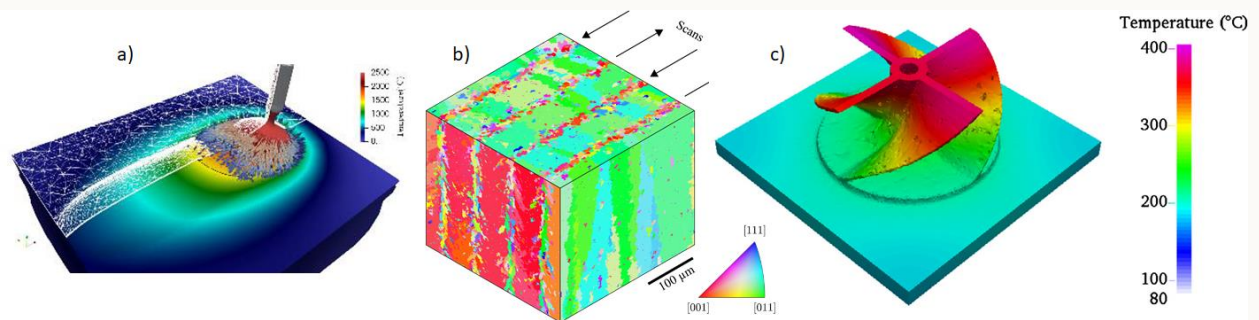


Figure: Simulation of the additive manufacturing process, more particularly a) of a WAAM bead [PhD student L. Ravix, MACCADAM Project], b) L-PBF microstructure and its texture [3]; c) thermal evolution of a complete piece [4].

The COLUMBO project is thus based on the methods and tools currently available at CEMEF, which will be applied and adapted to the WLAM process. COLUMBO aims, firstly, at developing a reliable prediction of the thermo-mechanical evolutions of the WLAM pieces at different manufacturing scales. Then, the module of microstructural evolution will be applied. The computed microstructures will be diffused to the project partners, as a virtual material, for the analysis of the propagation of ultrasonic waves to investigate the reliability of the NDT analysis methods. To fulfill these objectives, it may be necessary to consider models of dendritic growth kinetics as well as the mechanical behavior of the material. All the information provided by the model would make possible to investigate the potential occurrence of defects during manufacturing. At the end, the model and associated simulation tool should help the manufacturing of defect-free parts.

The experimental data will be provided by the other COLUMBO partners, considering the regular exchanges developed to follow the progress of the project. These data will be used to calibrate the numerical model. The influence of the physical properties of the materials and the process parameters on the bead (geometry and size of microstructure, deformation, etc.) and manufacturing defects will be consequently analyzed.

The numerical developments will enrich CEMEF's collaborative computing library, Cimlib (C++). The PhD student will thus benefit, in return, from the developments made by other users (re-meshing method, numerical resolution, parallelized approach, ...). The PhD student will receive training and will develop skills in the field of materials science, computational mechanics and transfers of energy and momentum with free interface. In addition, he/she will receive training in the field of scientific computing and programming, in particular to master CEMEF's computer tools.

References:

[1] Alexis Queva, Simulation numérique multiphysique du procédé de fusion laser de lit de poudre - Application aux alliages métalliques d'intérêt aéronautique, Doctorat MINES ParisTech, CEMEF – Sophia Antipolis, 2021

[2] 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

[3] T. Camus, Modelling of microstructures development in laser powder bed fusion process - Application on an IN718 nickel-base superalloy, European Congress And Exhibition On Advanced Materials And Processes – EUROMAT 2021

[4] 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

*Tools*

Finite element libraries, Cellular automaton, Tool dedicated to metallurgical transformations (library PY) Computing clusters and associated training

Key-words

WLAM, Additive manufacturing, Solidification, Microstructure, Thermomechanical modelling, CAFE modelling, NDT methods

Skills, abilities requested

Engineer or Master 2, in the field of Materials science, Mechanical science or Applied mathematics. Student interested in the modelling and numerical simulation of physical phenomena related to additive manufacturing processes.

Location

CEMEF, Sophia Antipolis (Site de Mines Paris)

CEMEF team

Metallurgy, Mechanics, Structures & Solidification – 2MS

Supervisors

Charles-André GANDIN (charles-andre.gandin@minesparis.psl.eu)  
Michel BELLET (michel.bellet@minesparis.psl.eu)  
Gildas GUILLEMOT (gildas.guillemot@minesparis.psl.eu)