

## Offre de Thèse 2026 - CEMEF

TITRE	<b>Contrôlabilité des pièces soudées dans les équipements critiques - Des matériaux virtuels pour des outils d'inspection CND efficaces</b>
Acronyme du projet	<b>ATALANTE</b>
Modalités d'encadrement, de suivi de la formation et d'avancement des recherches du doctorant	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 les permanents enseignants-chercheurs de l'équipe et bénéficiera des moyens informatiques du laboratoire, et de la formation associée, pour développer son activité.
Objectif général	<p>Ce doctorat a pour objectif de <b>modéliser le développement des microstructures lors des procédés de soudage</b> sur des pièces de grande épaisseur, dans le contexte des équipements nucléaires, pour lesquels des dépôts de plusieurs dizaines de passes sont régulièrement réalisés. L'un des enjeux du projet est de <b>proposer des approches numériques permettant de réaliser ces simulations dans des délais raisonnables</b>, compte tenu des volumes de matière déposés, tout en maintenant la précision attendue. Une part de l'activité concernera, en outre, la mise en place de <b>méthodes d'Intelligence Artificielle (IA)</b> de type <b>vision par ordinateur, pour faciliter cette prédiction</b>, sur la base des microstructures simulées.</p> <p>L'activité du projet <b>ATALANTE</b>, dans laquelle s'inscrit ce doctorat, se partage, ainsi, entre expérimentation, modélisation et valorisation, et rassemble cinq partenaires : <b>le CEMEF (Mines Paris PSL), l'ICB (Université Bourgogne Europe), le CEA LIST, EDF R&amp;D et TRANSVALOR</b>. Cette thèse est, ainsi, complétée d'une seconde thèse (<b>ICB</b>), dédiée aux développements expérimentaux. Par ailleurs, un post-doctorat (<b>CEA LIST</b>) visera à développer la modélisation numérique du Contrôle Non Destructif (CND) sur les structures de grains virtuelles obtenues.</p>
Contexte	<p>Dans le domaine du nucléaire, l'intégrité des composants soudés est évaluée à l'aide de <b>méthodes CND par ultrasons</b>, qui fournissent des informations essentielles sur la morphologie, l'orientation et la localisation des défauts. Cependant, la mise en œuvre de ces méthodes demeure complexe dans le cas des <b>aciers inoxydables austénitiques</b>, dont les soudures, réalisées par le dépôt de nombreuses passes, présentent une microstructure hétérogène et anisotrope, entraînant la <b>divergence</b> et l'<b>atténuation</b> du faisceau d'onde. La <b>modélisation numérique</b> de ces microstructures, influencée par la nature des matériaux et les paramètres de soudage est un enjeu majeur pour l'optimisation future des méthodes CND.</p> <p>Ce doctorat se propose, ainsi, de <b>développer des microstructures virtuelles sur des pièces soudées de grandes épaisseurs</b> pour permettre, par les autres partenaires de <b>ATALANTE</b>, de simuler la propagation d'ondes ultrasonores et améliorer les outils CND. Il s'agira de relever le défi de caractériser la formation et la variabilité de ces microstructures de grains sur des soudures comportant un nombre élevé de passes.</p>
Présentation détaillée	Le CEMEF a développé, précédemment, différents outils de modélisation des procédés de solidification en soudage [1] et fabrication additive [2,3]. Il s'est attaché, ainsi, à proposer des modèles pertinents permettant une prédiction des structures de grains, lors du dépôt de cordons de matière isolés, de l'échelle méso- [3] à l'échelle macroscopique [4]. Ces modèles

ont permis d'étudier l'influence des paramètres de construction (puissance, vitesse des sources de chaleurs ...) ou des conditions de scans (trajectoire ...) (Fig. 1 (a)) en soudage TIG (projet ANR NEMESIS). Ces résolutions se basent sur un couplage entre méthodes Automate Cellulaire et Eléments Finis (CA-FE). La méthode FE s'attache à résoudre les équations de conservation de la chaleur (évolution thermique) et du moment dans le bain liquide (écoulements). L'approche automates cellulaires (CA) exploite une grille régulière de cellules pour suivre les évolutions microstructurales (germination, croissance, capture des grains), notamment par épitaxie. Une nouvelle méthodologie 'hybride' [2] (Fig. 1 (c)), plus récente, consiste à translater le champ thermique stationnaire le long de la construction visée. Elle permet un dépôt de plusieurs dizaines de cordons, en des temps de calcul acceptables, et est d'un intérêt premier dans le cadre de ATALANTE.

Sur la base de ces outils, ce projet vise à développer une modélisation fiable des microstructures formées lors des procédés de soudage multipasses, sur les aciers austénitiques 316L utilisés dans les équipements du nucléaire. La validation des travaux sera basée sur les expériences et observations conduites parallèlement à l'ICB. Dans une seconde étape, des outils de Machine Learning seront mis en œuvre pour exploiter les données produites et améliorer la prédiction microstructurale en soudage. Cette étape nécessitera ainsi la production, en un temps raisonnable, d'un volume de données suffisant pour la réalisation des étapes d'apprentissage et de validation en IA. Des simulations de la propagation ultrasonore seront entreprises, au cours de projet, avec les logiciels CIVA (Fig. 1 (b)) et A3D-CND par le CEA LIST et EDF R&D, à partir des matériaux virtuels produits, analysant l'effet de la microstructure, et son impact sur l'efficacité de ces outils CND. La dépendance avec les conditions de dépôt sera étudiée, définissant les situations problématiques. **ATALANTE** représentera une avancée technologique indéniable dans le contrôle des pièces soudées et la fiabilité des méthodes de contrôle. Une interaction forte avec les autres partenaires du projet est attendue.

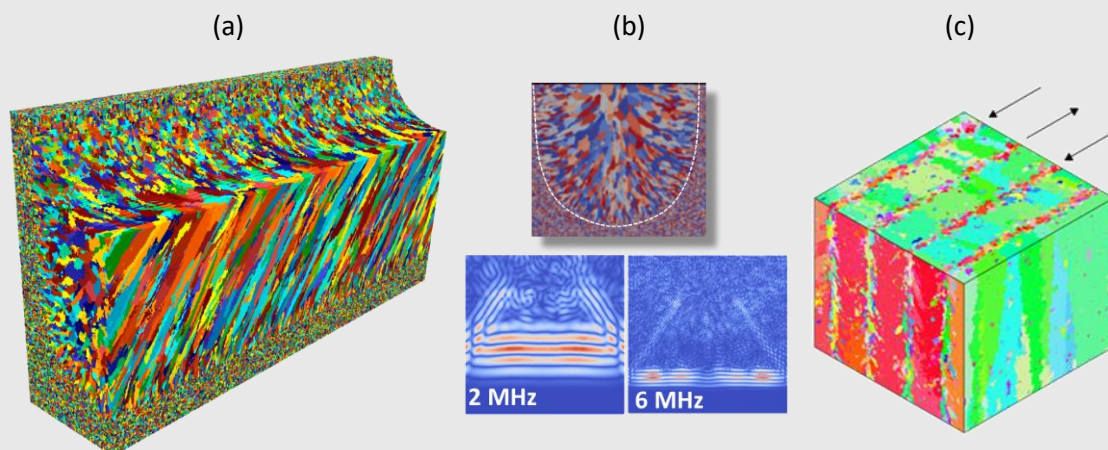


Fig. 1 : (a) Structure de solidification simulée par approche CAFE lors du dépôt de trois cordons (Soudage TIG avec apport de matière – Doct. C. Xue). (b) Propagation d'onde ultrasonore dans les structures de grains virtuelles (simulation CEA LIST – logiciel CIVA). (c) Structure de grains simulée en approche 'hybride' (Procédé LPBF - Doct. T. Camus [2]), par translation d'un champ thermique stationnaire.

L'intégralité des développements numériques enrichiront les bibliothèques de calcul du CEMEF.

Le/La doctorant(e) recruté(e) bénéficiera, de même, des travaux des autres utilisateurs (résolution numérique, approche parallélisée ...). Il/Elle développera ses compétences dans le domaine de la science des matériaux et de la mécanique numérique. En complément, il/elle recevra une formation poussée dans le domaine du calcul scientifique et de la programmation.

#### Réf. bibliographiques

- [1] 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* 21, 2021, 101305
- [2] T. Camus, D. Maisonnnette, O. Baulin, O. Senninger, G. Guillemot, Ch.-A. Gandin, Three-Dimensional Modeling of Solidification Grain Structures Generated by Laser Powder Bed Fusion, *Materialia* 30, 2023, 101804

	<p>[3] Z. Kong, G. Guillemot, M. Bellet, Ch.-A. Gandin, Multiphysics simulation and microstructure prediction of coaxial wire-laser additive manufacturing process, <i>Materialia</i> 42, 2025, 102461</p> <p>[4] 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. <i>Metals</i> 2024, 14, 1173</p> <p>[5] P. Belamri, H. Proudhon, D. Texier, D. Ryckelynck, Quaternion-based vision-transformer for polycrystalline EBSD scans pre-trained on large-scale synthetic data, <i>Materials &amp; Design</i> 258, 114599, 2025</p>
Objectifs de valorisation des travaux de recherche du doctorant	<p>Communication dans les congrès nationaux et internationaux.</p> <p>Publication dans les journaux scientifiques du domaine.</p>
Outils	<p>Librairies éléments finis CIMLIB (Fusalurgy), automate cellulaire, suivi des transformations métallurgiques (bibliothèque PhysalurgY - PY), clusters de calculs et formations associées</p>
Mots-clé	<p>Solidification, Microstructure, Modélisation, Intelligence Artificielle, Soudage, Nucléaire</p>
Profil & compétences	<p>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.</p>
Salaire	<p>27 k€ brut annuel</p>
Lieux	<p>CEMEF, Sophia Antipolis (Site de Mines Paris – PSL, Campus Pierre Laffitte)</p>
Equipe(s) de recherche	<p>Métallurgie, Mécanique, Structures et Solidification – 2MS</p> <p>Mécanique Numérique des Solides – CSM</p>
Encadrant / Dir. de thèse	<p>Gildas GUILLEMOT (<a href="mailto:gildas.guillemot@minesparis.psl.eu">gildas.guillemot@minesparis.psl.eu</a>)</p> <p>Charles-André GANDIN (<a href="mailto:charles-andre.gandin@minesparis.psl.eu">charles-andre.gandin@minesparis.psl.eu</a>)</p> <p>David RYCKELYNCK (<a href="mailto:david.ryckelynck@minesparis.psl.eu">david.ryckelynck@minesparis.psl.eu</a>)</p>

### **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>