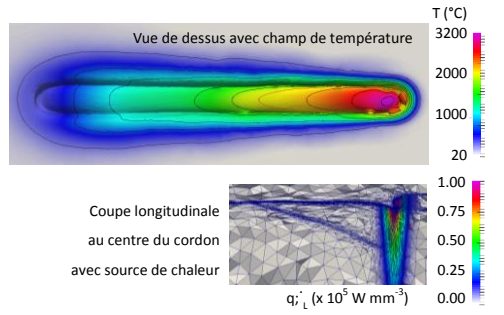
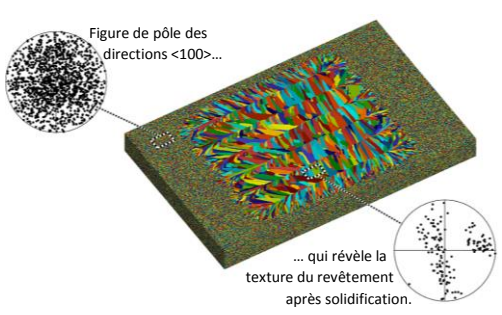


TITRE	Modélisation des microstructures (μS) générées en fabrication additive (AM) par fusion laser sélective (SLM) d'un alliage base nickel
Acronyme du projet	μSAM
Objectif général de la thèse	Modéliser les structures de solidification granulaire, la nature et la quantité des phases solidifiées, ainsi que les transformations de phase subséquentes se produisant lors du procédé AM-SLM appliqué à un alliage base nickel.
Contexte et enjeux	<p>La fabrication additive (AM) par fusion laser sélective (SLM) est d'un grand intérêt compte tenu de sa capacité à réaliser des géométries complexes et non traditionnelles. Cependant, les microstructures générées par ce procédé peuvent fortement s'écarter de leurs contreparties élaborées de manière conventionnelle. L'introduction d'une source de chaleur spatialement et temporellement mobile mène au développement d'une hétérogénéité microstructurale significative: mélange de grains colonnaires (allongés) et équiaxes (isotropes), ayant souvent une périodicité visible correspondant à la hauteur de la couche, à la largeur de la ligne et au motif de balayage utilisé. A ces hétérogénéités microstructurales sont associées des textures cristallographiques qui influencent le comportement mécanique des pièces. Le choix des trajectoires, mais aussi de la hauteur de poudre à fusionner, de la puissance et de la vitesse du laser définissent la stratégie de construction d'une pièce. Le contrôle de la source de chaleur est ainsi primordial pour piloter la structure de grains solidifiée, et obtenir des microstructures optimales pour les applications visées.</p> <p>Par ailleurs, le procédé AM-SLM met en jeu de fortes vitesses de solidification et des gradients de température élevés. Les vitesses de refroidissement sont donc également très importantes, conduisant à la formation de microstructures pouvant s'éloigner fortement de l'équilibre thermodynamique. Dans le cas des alliages industriels de type superalliage base nickel, cela peut notamment correspondre à des séquences indésirables de précipitation de phases intermétalliques depuis l'état liquide, à des solutions solides trempées de composition très éloignée de l'équilibre thermodynamique, sans ou avec peu de phases précipitées, voire des structures de solidification primaires inattendues ou de morphologies fortement éloignées de celles produites par des procédés plus conventionnels.</p> <p>Il devient alors nécessaire de disposer d'outils numériques pour comprendre la formation des microstructures issues du procédé AM-SLM, pour étudier le rôle de la composition des alliages et des paramètres du procédé, voire pour piloter l'obtention des structures désirées. Les structures prédites peuvent également servir le chaînage numérique pour accéder aux propriétés finales des pièces formées par AM-SLM ou encore pour améliorer la prédiction de la fissuration à chaud formée au cours du procédé, défaut rédhibitoire souvent rencontré.</p>
Illustrations	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="395 1570 900 1883">  <p>Figure 1. Simulation éléments finis du procédé AM-SLM appliquée à des matériaux céramiques [1].</p> </div> <div data-bbox="919 1570 1423 1883">  <p>Figure 2. Simulation automate cellulaire de la structure de grains pour un procédé de soudage à l'arc [2].</p> </div> </div>

<p>Déroulement</p>	<p>La librairie de calcul du CEMEF basée sur la méthode des éléments finis (FE) sera utilisée pour la modélisation du procédé AM-SLM [1]. Elle sera couplée à la modélisation de la structure de grains basée sur la méthode des automates cellulaires (CA) [2]. Les cycles thermiques dus aux passages successifs du laser serviront d'entrée à la prédiction de l'évolution de la microstructure de la solution solide, basée sur l'exploitation de la librairie PhysalurgY [3].</p> <p>La simulation du procédé AM-SLM, actuellement réalisée pour des céramiques et limitée à quelques cordons rectilignes, sera adaptée pour des alliages métalliques et des drapages multicouches. Le travail portera principalement sur une adaptation de la source de chaleur décrivant l'interaction de l'alliage métallique avec le laser pour prédire le champ de température (Figure 1) et la réalisation de calculs multi-cordons multicouches à stratégies de balayage variables. Les paramètres de la source de chaleur seront identifiés par des essais et mesures effectués sur une machine AM-SLM instrumentée. Une caméra thermique dont les déplacements sont associés à la source de chaleur enregistrera le champ de température qui pourra ainsi être comparé à la simulation. Les profils dans des coupes transverses et longitudinales seront extraits de cordons simples et multiples, correspondant respectivement à une unique couche déposée sur substrat et à un ensemble de couches successives. Ces données seront comparées aux simulations du procédé AM-SLM.</p> <p>Par ailleurs, une adaptation du modèle automate cellulaire initialement développé pour des procédés de soudage à l'arc (Figure 2) sera également nécessaire pour le couplage avec la simulation du procédé AM-SLM. La structure de grains simulée sera comparée à des mesures EBSD sur les mêmes expériences que celles ayant donné lieu à la calibration de la thermique. En plus de la structure de grains provenant de la croissance dendritique de la phase de solidification primaire, les phases intermétalliques formées depuis l'état liquide seront prédites. La composition de la solution solide primaire étant connue, une simulation de la précipitation sera conduite en suivant l'histoire thermique locale. Cela ne sera pas mené sur tout le domaine de simulation utilisé pour prédire la structure de grains mais en seulement quelques points choisis pour leur représentativité. La prédiction des phases intermétalliques formées depuis l'état liquide et de l'état précipité sera comparée aux données expérimentales.</p> <p>L'alliage considéré pourra être l'INCONEL 617. Afin d'être au plus proche de la description thermodynamique de cet alliage, la librairie PhysalurgY sera utilisée pour tabuler les propriétés et réaliser les couplages avec les cinétiques de transformations de phases. Suivant les résultats expérimentaux, il pourra être nécessaire de développer le concept de zone couplée et la modélisation des phénomènes de solidification hors équilibres afin de prédire la morphologie et/ou les microstructures qui rentrent en compétition.</p> <p>Toutes les données expérimentales décrites ci-dessus – expériences, instrumentations, caractérisation des cordons et drapages, ainsi que la caractérisation des microstructures associées – seront produites dans le cadre d'un second projet de thèse conduit par un doctorant à recruter qui sera basé au Centre des Matériaux de MINES ParisTech. Ce second projet exploitera donc les machines et moyens de caractérisation du Centre des Matériaux de MINES ParisTech en attendant la possibilité d'un transfert sur les machines AFH en cours d'acquisition.</p> <p>[1] Q. Chen, G. Guillemot, Ch.-A. Gandin, M. Bellet, Additive Manufacturing (2018) in press. [2] S. Chen, G. Guillemot, Ch.-A. Gandin, Acta Materialia 115 (2016) 448. [3] physalurgy.cemef.mines-paristech.fr</p>
<p>Outils</p>	<p>Base de données Thermo-Calc TCNI8</p>
<p>Mots-clés</p>	<p>Microstructures, Modélisation, Fabrication additive, Fusion laser sélective, Alliage base nickel</p>
<p>Type de projet / collaboration</p>	<p>Thèse du consortium Additive Factory Hub Collaboration pour la partie expérimentale avec le Centre des Matériaux de MINES ParisTech (thèse lancée en parallèle)</p>

Profil et compétences recherchés	Ingénieur ou équivalent, avec de bonnes notions de calcul scientifique et une formation mécanique et matériaux
Lieu	MINES ParisTech CEMEF, Sophia Antipolis, France
Equipe(s) de recherche	Structures et Propriétés dans les Procédés de Solidification Charles-André GANDIN, Gildas GUILLEMOT