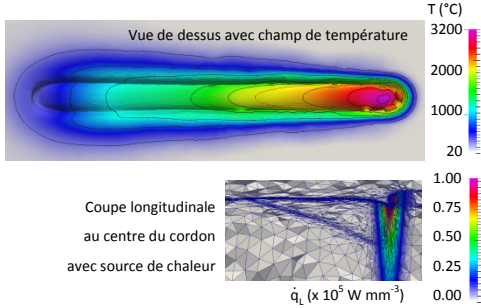
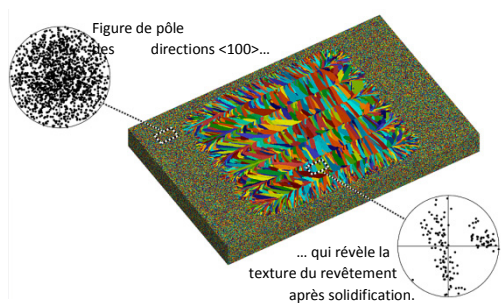


TITRE	Modélisation des microstructures (μS) générées en fabrication additive (AM) par fusion laser sélective (SLM) d'un alliage base nickel
Acronyme	μSAM
Objectif général	Modéliser les structures de solidification granulaire, la nature et la quantité des phases solidifiées, ainsi que les transformations 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 récurrent souvent rencontré.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="395 1630 877 1937">  </div> <div data-bbox="925 1630 1428 1937">  </div> </div>
Fig. 1.	Simulation éléments finis du procédé AM-SLM appliquée à des matériaux céramiques [1].
Fig. 2.	Simulation automate cellulaire de la structure de grains pour un procédé de soudage à l'arc [2]

Déroutement	<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>Le matériau considéré sera un alliage base nickel. Afin d'être au plus proche de la description thermodynamique, 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 rentraient 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>
Réf. bibliographiques	<p>[1] Q. Chen, G. Guillemot, Ch.-A. Gandin, M. Bellet, Additive Manufacturing 21 (2018) 713. [2] S. Chen, G. Guillemot, Ch.-A. Gandin, Acta Materialia 115 (2016) 448. [3] physalurgy.cemef.mines-paristech.fr</p>
Outils	Base de données Thermo-Calc TCNI8
Mots-clé	Microstructures, Modélisation, Fabrication additive, Fusion laser sélective, Alliage base nickel
Type projet	Thèse du consortium Additive Factory Hub avec convention ANRT-CIFRE. Collaboration pour la partie expérimentale avec le Centre des Matériaux MINES ParisTech (thèse lancée en parallèle)
Profil & compétences	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
Encadrants	Charles-André GANDIN, Gildas GUILLEMOT, Oriane SENNINGER Charles-Andre.GANDIN@mines-paristech.fr

TITLE	Modeling of microstructures (μS) formed in additive manufacturing (AM) selective laser melting (SLM) process of a nickel base alloy. Acronym : μSAM
Global objective of work	Modeling of the solidification grain structure generated during an SLM process and applied on a nickel base alloy. Modeling of the nature of structures, quantities of solidified phases and subsequent phase transformations.
Context	<p>Additive Manufacturing (AM) by Selective Laser Melting (SLM) is of high industrial interest due to its capacity to generate complex geometries. However, microstructures formed in this process can be very different from what has been observed until now in cast solidification. The movement of the heat source induces significant microstructural heterogeneities, with a combination of columnar (elongated) and equiaxe (isotropic) grains. The periodicity of this microstructural pattern corresponds usually to the powder layer thickness, to the size of the melted area and to the laser path strategy. In addition to these microstructural heterogeneities, crystallographic texture is observed and has an influence on the mechanical behavior of pieces manufactured. To fabricate pieces with AM manufacturing, a strategy has to be defined, which is given by the laser trajectory, the powder layer thickness and the laser heat power and speed. Controlling the heat source is therefore necessary to control solidified grain structures and to obtain optimal microstructures for specific applications. Moreover, the SLM process generates high speed solidifications in gigantic thermal gradients. Cooling rates are therefore very fast, leading to the formation of microstructures which can be very far from their thermodynamic equilibrium. In case of industrial alloys such as nickel base super alloys, this can lead to the formation of unwanted intermetallic phases from the liquid phase, to the formation of structures with a composition such that precipitation in the solid state is not possible or lazy, or also to the formation of morphologies very far from what was expected. It becomes therefore necessary to develop numerical tools to understand the formation of microstructures in the AM-SLM process, and to study the role of alloy's composition and of process parameters. Optimal microstructures can even be driven from these numerical models. Structures predicted can also be taken as inputs in other numerical tools to predict properties of pieces manufactured with AM-SLM. They can finally be used to improve the prediction of hot cracking during the process.</p>
Project development	<p>The computation library of CEMEF, which is based on the finite element method (FE), will be used to model the AM-SLM process [1]. This library will be coupled to the modeling of grain structures using the cellular automaton method (CA) [2]. Thermal cycles resulting from successive laser path will be taken as inputs to predict solid state phase transformations, using the PhysalurgY library [3].</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="395 1256 879 1570"> </div> <div data-bbox="911 1256 1449 1570"> </div> </div> <p>Fig. 1. Finite Element simulation of the SLM process applied to a ceramic material [1].</p> <p>Fig. 2. Finite Element simulation of the SLM process applied to a ceramic material [2]</p> <p>The modeling of the AM-SLM process currently exists for ceramic materials but is limited to straight-lined cords. It has therefore to be adapted to metallic materials and to multi-layer paths. The PhD work will mainly consist in adapting the modeling of heat source, which represents the interaction between the metallic alloy and the laser in order to predict the temperature field (Figure 1). Multi-layer paths will also have to be introduced in the model to simulate different laser path strategies. Parameters of the heat source will be determined from tests and measurements performed on AM-SLM instrumented machines. A thermal camera, placed on the heat source, will record the temperature field during the AM process. These records will be compared to simulations. Temperature profiles in transverse and longitudinal sections will be extracted from simple and multiple cords. In addition, the cellular automaton model, initially developed for arc welding (Figure 2), will have to be adapted in order to model the AM-SLM process. The modeled grain structure will be compared to EBSD measurements performed on the sample samples as the one used for the temperature calibration. In addition to the dendritic grain structure corresponding to the primary phase solidification, intermetallic phases formed from the liquid phase will also have to be modeled. As</p>

	<p>the composition of the primary solid phase will be known, a modeling of precipitation in solid state corresponding to the thermal history of the piece will be performed. This modeling will not be performed on the whole domain but only in specific areas. This global simulation of the evolution of the microstructure will be compared to experiments. The material studied is a nickel base alloy. In order to manipulate detailed thermodynamic informations, the Physalurgy library will be used to tabulate properties and to couple these informations to kinetic phase transformations. Depending on results, it might be necessary to develop the concept of coupled zone and to model out of equilibrium solidification processes to predict competitions between various possible microstructures. All experimental datas previously describes (Experiments, instrumental facilities, characterization of the laser path and resulting microstructures) will be produced in another PhD project located in the research center Centre des Matériaux of Mines ParisTech. References: [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>
<i>Tools</i>	Tools Thermo-Calc TCNI8 Database
<i>Key-words</i>	Microstructures, Modeling, Additive manufacturing, Selective laser melting, nickel base alloys
<i>Project type</i>	PhD project part of Additive Factory Hub consortium with a ANRT-CIFRE convention For the experimental part, collaboration with Centre des Matériaux of MINES ParisTech (other PhD project)
<i>Skills, abilities</i>	Master degree in materials science
<i>Location</i>	MINES ParisTech CEMEF, Sophia Antipolis, France
<i>CEMEF team(s)</i>	Pôle Alliages métalliques (PAM) – Team Structures and Properties in Solidification Processes (SP2)
<i>Supervisor(s)</i>	Charles-André GANDIN, Gildas GUILLEMOT, Oriane SENNINGER Charles-Andre.GANDIN@mines-paristech.fr