

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Développement d'alliages d'aluminium dédiés à la Fabrication Additive L-PBF

Référence : **MAS-DMAS-2025-26**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 01/10/2025

Date limite de candidature : 01/07/2025

Mots clés : Fabrication Additive, développement d'alliages, caractérisation multi-échelle

Profil et compétences recherchées : Mécanique des milieux continus, métallurgie, Ecole ingénieur ou Universitaire avec Master II

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

L'avènement des procédés de Fabrication Additive (FA) ces dernières années a permis d'accéder à des pièces de géométrie complexe difficilement usinables par les voies d'élaboration conventionnelles. Toutefois, l'élaboration par FA conduit à des microstructures et états métallurgiques différents de ceux obtenus par les procédés conventionnels. A l'heure actuelle, l'objectif des industriels est de pouvoir utiliser les matériaux aéronautiques traditionnels et de mettre en œuvre des traitements thermiques d'homogénéisation post-élaboration, afin de s'assurer que les propriétés mécaniques sont proches de celles obtenues par les procédés conventionnels. Cependant, la définition de nouvelles nuances d'alliage dédiées à la FA peut permettre de bénéficier des spécificités de ces procédés d'élaboration.

Pour le secteur aéronautique, on peut noter un fort intérêt pour l'étude des nuances d'alliages d'aluminium, et en particulier celles des séries 2000 et 7000 qui garantissent des propriétés mécaniques suffisantes pour répondre à la plupart des spécifications aéronautiques. De gros enjeux portent sur ces familles d'alliages d'autant qu'ils sont réputés non soudables. On comprend ainsi l'importance des études sur le développement d'alliages d'aluminium adaptés pour la FA, afin notamment de les rendre plus tolérants vis-à-vis des gradients thermiques élevés rencontrés en FA tout en garantissant un niveau de propriétés mécaniques satisfaisant.

Dans le cadre de cette thèse, on s'intéressera au procédé L-PBF, pour Laser Powder Bed Fusion, qui est un procédé de fabrication additive par fusion successive de couches de matériau à l'état de poudre via le passage d'un laser. Ce procédé se caractérise par des interactions très courtes entre la matière première (poudre) et le laser, ce qui occasionne des vitesses de solidification et de refroidissement très rapides. Il en résulte une microstructure complexe avec notamment l'apparition de fortes sursaturations dans la matrice, la précipitation de phases durcissantes ainsi que la formation de dislocations dues à l'écrouissage thermique. Ces phénomènes se produisent de façon concomitante et permettent d'obtenir des alliages ayant un durcissement remarquable dès l'état brut de fabrication.

L'un des enjeux majeurs dans ce travail de définition de nouvelles nuances d'alliages d'aluminium dédiées à l'élaboration par L-PBF est de pouvoir comprendre les phénomènes fondamentaux à l'échelle de la microstructure et notamment le lien entre la précipitation de phases durcissantes et l'écrouissage thermique, mais également la réponse mécanique de la pièce à l'état brut d'élaboration. En effet, les états métallurgiques induits par ce procédé de fabrication sont caractérisés par des hétérogénéités de microstructure à plusieurs échelles, depuis la morphologie des grains jusqu'à la nature chimique et la taille des précipités nanométriques durcissants le matériau en intragranulaire. Comprendre les conséquences de ces hétérogénéités microstructurales sur la réponse mécanique de ces alliages élaborés par L-PBF constitue tout l'enjeu de ce travail de thèse.

La démarche suivie dans cette thèse s'inscrit dans la problématique de définition de nuances d'alliages d'aluminium adaptées à l'élaboration par FA qui permettent de bénéficier des avantages métallurgiques de ces procédés. Nous avons choisi de commencer par l'étude du système binaire Al-Fe, car les alliages durcis par des petits précipités à base de fer ont un meilleur comportement mécanique à haute température que les alliages d'aluminium usuels. Une particularité du travail qui est proposé est donc de contrôler directement, au travers des paramètres d'élaboration, les spécificités de l'organisation métallurgique qui confèrent des propriétés mécaniques remarquables au système Al-Fe. Pour cela, il faut être capable de comprendre

l'impact de chacun de ces paramètres – dont les plus significatifs sont la puissance et la vitesse d'avance du laser, et la température du plateau de fabrication – sur la microstructure obtenue à l'état brut d'élaboration. Ce travail consistera donc à étudier l'impact de différentes paramétries d'élaboration par L-PBF sur la microstructure et la réponse mécanique du matériau. Une attention particulière sera apportée à l'aspect hétérogène du comportement de l'alliage, notamment par le biais de caractérisations mécaniques locales.

Dans un deuxième temps, l'objectif sera d'aller vers des nuances plus représentatives des besoins industriels, basées sur des systèmes à trois ou quatre éléments d'alliage. L'intérêt majeur du développement de ces nuances d'aluminium simplifiées et dédiées à la FA est de proposer une tenue en fluage améliorée. Les mécanismes de fluage induits par l'organisation microstructurale particulière obtenue pour nos échantillons seront étudiés à l'échelle de la microstructure.

Les travaux de thèse comporteront plusieurs volets complémentaires, expérimentaux et de modélisation.

Volet expérimental :

Pour caractériser les hétérogénéités de microstructure, un certain nombre de caractérisations microstructurales et mécaniques, seront réalisées aux différentes échelles d'intérêt.

- Une caractérisation fine de microstructures brutes de fabrication par microscopie électronique à balayage (MEB) et en transmission (TEM) et par diffraction de rayons X (DRX) sera menée sur plusieurs échantillons à teneur variable en Fe. Une attention particulière sera portée à la description de l'évolution de la microstructure à travers le bain de fusion, aux différentes échelles d'analyse. Sur la base de ces premiers résultats, différentes paramétries de fabrication seront testées.
- Une attention particulière sera portée à l'effet de la chimie locale (confrontation d'analyses de composition réalisées au microscope électronique en transmission à des mesures obtenues par Sonde Atomique Tomographique). La connaissance de cette chimie locale est nécessaire, car la teneur en fer de la matrice est un mécanisme de durcissement important.
- La réponse mécanique du matériau sera étudiée à deux échelles d'intérêt : à l'échelle macroscopique, par le biais d'essais de traction et de fluage, à température ambiante et à la température visée de fonctionnement (250°C) ; et à l'échelle des bains de fusion, grâce à la mise en œuvre d'une campagne expérimentale basée sur la réalisation d'essais de traction *in situ* dans un MEB, permettant le suivi des champs de déformation par corrélation d'images. Il s'agira d'analyser les différences de comportement local dues à la microstructure sous-jacente.

Volet modélisation :

Le but de la modélisation est double. Il s'agit d'une part de proposer un modèle phénoménologique de durcissement établi sur la base des propriétés microstructurales du matériau. Ce modèle permettra de révéler l'importance relative des différents mécanismes de durcissement sur le comportement mécanique macroscopique. Les paramètres de ce modèle seront déduits des caractérisations microstructurales et des mesures de comportement locales. Le modèle sera testé sur l'ensemble des échantillons dont nous disposerons, afin de permettre une validation du formalisme proposé et d'affiner la compréhension du rôle de chacun des éléments de la microstructure. Ensuite, le modèle sera utilisé afin de faire le lien entre les paramètres de fabrication par L-PBF et le niveau de durcissement du matériau.

D'autre part, afin de bien comprendre l'impact des hétérogénéités microstructurales sur le comportement macroscopique, des calculs en champ complet seront réalisés en utilisant des lois élasto-visco-plastiques existantes et les résultats seront confrontés à ceux obtenus dans le cadre des essais micromécaniques *in situ* dans le MEB. Les résultats de ces calculs pourront servir de guide afin d'améliorer la formulation du modèle phénoménologique.

Collaborations envisagées

CNES – end user pour les problématiques de réparation par Fabrication Additive

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Matériaux et Structures

Lieu (centre ONERA) : Châtillon

Contact : Louise Toualbi

Tél. : 01 46 73 46 55 Email : louise.toualbi@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : Yann Le Bouar

Laboratoire : LEM

Tél. : 01 46 73 45 92

Email : yann.lebouar@cnr.fr

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>

e. Le cas échéant, chacun des partenaires financera une demi-bourse.