

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Méthodologie expérimentale et numérique pour la maîtrise des contraintes résiduelles dans les matériaux issus de fabrication additive

Référence : **MAS-DMAS-2025-27**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 01/09/2025

Date limite de candidature : 01/07/2025

Mots clés

Fabrication additive, stratégie de fabrication, contraintes résiduelles, diffraction des rayons X, propriétés mécaniques

Profil et compétences recherchées

- titulaire d'un master 2 recherche, du domaine du génie mécanique et/ou matériaux ;
- connaissances générales sur les procédés de la fabrication additive ;
- connaissances générales sur la mesure des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X ;
- connaissances sur les matériaux, sur leur comportement thermique, mécanique ;
- appétence pour l'expérimentation et la mesure ;
- maîtrise de langages de programmation scientifique (Matlab, Python) ;
- niveau de langue en anglais minimum (B2) pour la communication écrite et orale.

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Les procédés de fabrication additive (FA) permettent de produire des structures métalliques avec une grande liberté de conception, notamment en termes de dimensions (structures massives ou parois fines) et de géométries qui peuvent être particulièrement complexes. Parmi ces procédés, la fusion laser sur lit de poudre (L-PBF) est l'un des plus courants. Ce procédé consiste à faire fondre la matière première sous forme de poudre par le passage d'un laser, couche après couche, pour construire une structure avec la géométrie souhaitée. Pendant la fabrication, la fusion répétée et la solidification rapide et directionnelle créent de grands gradients de température qui génèrent de fortes contraintes thermiques. Ces contraintes thermiques peuvent entraîner des fissures ou des délaminations durant la fabrication. Plus souvent, des contraintes résiduelles (CR) importantes causées par les contraintes thermiques générées par le procédé subsistent dans la pièce après son élaboration. Ces contraintes résiduelles ont un effet significatif sur la stabilité dimensionnelle de la pièce, sa résistance à la corrosion, sa résistance à la propagation des fissures et sur ses propriétés mécaniques. Elles peuvent aussi mener à une défaillance de la pièce en service. Ainsi, la connaissance du champ de contraintes résiduelles est cruciale pour l'optimisation du processus, l'amélioration de l'efficacité et de la qualité des pièces ainsi élaborées. Cette problématique est également présente dans d'autres procédés de FA (DED, WLAM, etc.) où une poudre ou un fil métallique est fondu par une source laser à haute énergie et déposé sélectivement couche par couche sur un substrat.

Les techniques basées sur la diffraction des rayons X (DRX) permettent une caractérisation non destructive du champ de contraintes résiduelles. Ces méthodes nécessitent une bonne connaissance du matériau étudié, car certaines hypothèses doivent être formulées pour déterminer précisément les contraintes résiduelles à partir des résultats de mesure. Tout d'abord, les espacements des plans cristallins mesurés doivent être convertis en déformations cristallines à partir de données issues du matériau sans déformation. Ensuite, les déformations cristallines mesurées doivent être reliées à la contrainte macroscopique (contrainte de type I) en utilisant la loi de Hooke, ce qui nécessite de connaître la rigidité du matériau. Comme la plupart des structures cristallines présentent un comportement anisotrope, le comportement élastique est spécifique à chaque plan cristallin du monocristal. Ainsi, l'utilisation de plans cristallins individuels dans l'analyse des contraintes résiduelles nécessite la connaissance des propriétés élastiques spécifiques aux plans cristallins. De plus, la connaissance de la microstructure et de la texture du matériau sont nécessaires pour une évaluation fiable des contraintes résiduelles. Étant donné que les contraintes de type I (macroscopiques) et II (intergranulaires) affectent les espacements interplanaires d'un ensemble particulier de plans cristallographiques de manière similaire, toute tentative d'évaluer les premières sans tenir compte de l'effet des secondes est vouée à être inexacte. L'estimation des contraintes de type II sera donc considérée dans ce contexte spécifique.

Bien que la formation des contraintes résiduelles ait été largement étudiée, les mécanismes principaux menant à leur développement en FA n'ont pas encore été entièrement compris et, *a fortiori*, maîtrisés. À ce jour, plusieurs stratégies basées sur la réduction des gradients thermiques pendant l'élaboration ont été développées, cependant, la complexité des phénomènes métallurgiques mis en jeu ne permet pas encore une maîtrise totale du niveau de contraintes résiduelles à l'état brut de fabrication, et à l'heure actuelle, la plupart des industriels préfèrent appliquer des traitements thermiques d'homogénéisation post-élaboration. Or, les spécificités induites par les procédés de FA (fortes vitesses de refroidissement, précipitation de phases métastables, cyclage thermique) nécessitent une adaptation des traitements thermiques de détensionnement usuellement utilisés. Une meilleure connaissance du champ de contraintes résiduelles à l'état brut de fabrication permettra de proposer des traitements thermiques plus adaptés aux pièces considérées.

Par ailleurs, dans le cadre de la problématique de la réparation de pièces endommagées en fonctionnement ou de rebuts de production, les procédés de FA sont de plus en plus utilisés. Dans ce contexte de la réparation, où la mise en œuvre d'un traitement thermique de détensionnement n'est pas toujours possible, il est d'autant plus indispensable de connaître le champ de contraintes résiduelles laissé par l'étape de réparation, et son impact sur les propriétés mécaniques ultérieures de la pièce réparée.

C'est dans le cadre de cette double problématique que s'inscrit cette thèse en collaboration avec l'ENS Paris-Saclay. Le travail proposé vise à développer une méthodologie expérimentale et numérique pour comprendre, analyser et ensuite contrôler le développement des contraintes résiduelles dans la FA des matériaux métalliques. Elle pourra être appliquée à un superalliage à base de nickel produit par L-PBF (application fabrication) et à une nouvelle nuance d'alliage d'aluminium de la série 2xxx adaptée au procédé WLAM (application réparation).

Différentes étapes seront nécessaires pour la réalisation de ce travail. Dans un premier temps, l'état de l'art concernant les méthodes et modèles adaptés aux problématiques scientifiques étudiées sera réalisé à partir de la littérature.

Concernant le volet expérimental, l'anisotropie élastique et plastique du matériau sera étudiée à l'aide de la diffraction des rayons X, pour établir la relation entre la microstructure, la texture du matériau, son anisotropie élastique / plastique et les contraintes résiduelles surfaciques ainsi que dans l'épaisseur de l'échantillon. Les incertitudes liées aux différents types d'échantillons de référence sans contrainte (poudre, état métallurgique issu d'un procédé d'élaboration conventionnel, etc.) seront considérées. L'obtention des constantes élastiques radiocristallographiques passera par la mise en œuvre d'essais micromécaniques réalisés *in situ* dans le diffractomètre.

Concernant le volet numérique, un modèle thermomécanique par éléments finis, calibré expérimentalement, sera développé pour analyser la sensibilité des contraintes résiduelles aux paramètres du procédé (stratégie de balayage et la vitesse du laser, le préchauffage du plateau de fabrication, la densité d'énergie) et à la géométrie et à la taille des pièces considérées. Les données d'entrées seront issues de la modélisation macroscopique de la thermique du procédé développée au Laboratoire LURPA de l'ENS Paris-Saclay. Il est également envisagé de développer un modèle élasto-plastique à l'échelle des grains du polycristal pour prendre en compte les contraintes résiduelles de type II (intergranulaires) et prévoir le comportement mécanique des pièces en condition de service en particulier vis-à-vis de leur tenue en fatigue.

Enfin, pour l'étude de la relaxation des contraintes résiduelles sous sollicitations thermiques, mécaniques et thermomécaniques, des mesures *in situ* dans le diffractomètre à rayons X seront réalisées à partir d'une platine micromécanique. Sur la base de ces résultats expérimentaux et numériques, des recommandations sur la manière de minimiser les contraintes résiduelles durant le processus de FA seront proposées.

Collaborations envisagées :

Laboratoire LURPA, ENS Paris-Saclay, ENSAM Aix-en-Provence

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Département Matériaux et Structures

Lieu (centre ONERA) : Châtillon

Contact : Maria Tsoutsouva

Tél. 01 46 73 45 38

Email : maria.tsoutsouva@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : Sylvain Lavernhe

Laboratoire : LURPA - ENS Paris-Saclay –
Université Paris-Saclay

Tél. : 01 81 87 51 82

Email : sylvain.lavernhe@ens-paris-saclay.fr

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