



Programme de cotutelles Université de Sfax - UTT



Cotutelles ENIS U. Sfax, UTT et EPF de Troyes :

- **Intitulé du projet** : Intégration d'un procédé de fabrication additive par dépôt de fil chargé en poudre, dans un processus d'hybridation de matériaux et de procédés.
- **Nature du projet** : ALLOCATIONS DOCTORALES- COTUTELLES.
- **Directeur de thèse** : CHEMKHI Mahdi - Enseignant-chercheur (LASMIS/ EPF Troyes)
- **Co-directeur de thèse** : BOUAZIZ Zoubeir – Professeur (LMFAGPE /ENIS)
- **Participants** : RETRAINT Delphine – Professeur (LASMIS/UTT), GARDAN Julien - Enseignant-chercheur (LASMIS/ EPF Troyes).
- **Unité de recherche coordinatrice** : ICD-LASMIS de L'Université de Technologie de Troyes (UTT), en collaboration avec l'EPF de Troyes.

1. Contexte et objectifs du travail de recherche :

La fabrication additive, appelée aussi prototypage rapide ou impression 3D, a atteint ces dernières années une maturité qui lui permet de conquérir le monde industriel. Ceci est compréhensible d'une part par les nombreux avantages qu'offre la fabrication additive et d'autre part par la grande panoplie de procédés qui existent ainsi que le grand choix disponible.

L'EPF école d'ingénieur-e-s (EPF) et l'Université de Technologie de Troyes (UTT) disposent de compétences et de moyens matériels mis en commun afin de développer des actions de recherche et développement dans le domaine de la fabrication additive. Afin de développer leurs activités de recherche en fabrication additive et sur les matériaux fonctionnalisés, ils se sont équipés en 2019 d'une imprimante 3D métallique « Marforged - Metal X ». Cette nouvelle machine de fabrication additive métallique possède une technologie innovante par dépôt de fil chargé en poudre qui rend l'impression 3D métal plus accessible, plus rapide tout en diminuant les coûts de fabrication. Ce procédé offre des perspectives inédites en permettant d'élaborer des pièces avec des géométries complexes et une liberté de conception sans précédent. Cependant, elle présente encore certains inconvénients, notamment le coût élevé de la matière première ainsi que le manque de maîtrise des différents paramètres de fabrication. Par ailleurs, la fabrication additive n'est pas une fin en soi et en fonction de la géométrie des pièces, elle doit s'intégrer souvent au sein d'une chaîne complète de fabrication. Ceci est compréhensible puisque toutes les géométries ne sont pas adaptées à la fabrication additive, d'ailleurs elle est parfois plus coûteuse que les techniques traditionnelles (pour les géométries simples).

Dans ce contexte, grâce à la recherche de nouveaux matériaux et de procédés de fabrication, les propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux ne cessent d'être améliorées. L'intégration de nouveau procédé de fabrication additive dans un processus d'hybridation de matériaux et de procédés de fabrication, constitue un défi qui suscite l'intérêt des chercheurs aussi bien sur le plan académique qu'industriel.

Ce challenge offre un formidable contexte pour ce projet de thèse en cotutelle, qui repose sur des compétences complémentaires entre les équipes de recherche du LASMIS et du MFAMGPE de l'ENIS. Il s'inscrit dans l'optique de **maîtriser les paramètres de la nouvelle machine** tout en développant un système **d'aide à l'estimation du temps et du coût des pièces** issues de **matériaux et de procédés de fabrication hybrides** (Soustractive et Additive).

Ainsi, l'enjeu économique de la maîtrise des coûts en fabrication des structures complexes multi-matériaux, passe d'une part par la maîtrise des **paramètres de conception**, ainsi que la prise en compte de **caractéristiques globales de la fabrication**. D'autre part, **la maîtrise des interfaces** et de **leur impact sur le comportement mécanique**, est donc un enjeu important pour proposer des solutions performantes de **réduction des coûts et de productivité** des pièces hybrides.

2. Objectifs scientifiques :

L'objectif de ce projet de recherche est essentiellement d'obtenir des réponses plus précises aux questionnements des industriels sur **le comportement des matériaux produits par des procédés de fabrication hybrides** (Soustractive et Additive). Ainsi, l'optimisation de

l'hybridation et de la proposer comme alternative pourrait réduire les coûts globaux de fabrication, sans altérer la fonctionnalité et les propriétés d'usage de pièces métalliques obtenues par fabrication additive ou conventionnelle seule.

Les travaux du doctorant porteront à la fois sur **l'optimisation des paramètres du procédé** de la nouvelle machine (Markforged - Metal X) et sur la **mise au point d'un modèle numérique adaptés à l'hybridation tout en proposant un modèle d'estimation de coût**.

Ces objectifs principaux se déclinent en différents objectifs secondaires :

-De s'appuyer sur la méthode des plans d'expériences afin d'approfondir les connaissances quant à **l'influence de différents paramètres** du procédé par dépôt de fil chargé en poudre sur les propriétés structurales et mécaniques des pièces obtenues.

- De mettre en œuvre un **protocole expérimental d'élaboration de pièces hybrides**, qui tient compte des changements des modes de conception, de fabrication et d'assemblage. Il est donc nécessaire avant de lancer la fabrication des premières pièces de vérifier si les conceptions envisagées sont adaptées au procédé de fabrication additive. De plus, identifier des pièces de forte valeur ajoutée, afin de proposer des modèles de conception 3D adaptés à l'hybridation pour répondre et s'adapter à leurs contextes d'usages attendus.

-D'approfondir les connaissances au mécanisme de rupture au **niveau des interfaces des pièces ainsi** que leur impact sur le comportement mécanique des pièces finales. Un autre point intéressant sur lequel travailler serait l'analyse des différentes causes de défauts de jonctions métallurgiques, l'influence des conditions d'élaboration de fabrication des pièces. Ces analyses permettront par la suite de définir les actions correctives destinées à éliminer les causes de non qualité des pièces afin de maîtriser le processus dans sa globalité, débouchant ainsi sur de nouveaux gains d'efficience à tous les stades de son cycle de vie.

- De mettre en œuvre, **un modèle d'estimation de coût global de fabrication qui** intègre les caractéristiques géométriques et techniques durant tout le processus de fabrication. Les notions d'entité coût et de temps relatif pour chaque étape de fabrication et/ou d'assemblages seront prises en compte en utilisant des modèles analytiques.

Les conséquences de l'hybridation des procédés sur les propriétés mécaniques des pièces, ainsi que sur la précision de la méthode d'estimation des coûts et des temps de fabrication, seront également étudiés de manière approfondie.

3. Retombées potentielles :

Cette demande de subvention permettra de supporter les activités de recherche entreprises dans l'équipe de recherche et d'autre part de renforcer la collaboration de recherche entre l'UTT, l'EPF et l'ENIS U.Sfax qui concerne l'amélioration des propriétés d'usage de pièces métalliques obtenues par fabrication additive, suite à l'acquisition de la nouvelle machine de fabrication additive métallique « Markforged - Metal X ». Une éventuelle collaboration avec l'université de Sydney sur les aspects d'analyse microstructural est par ailleurs envisagée.

Les résultats obtenus feront l'objet de publications dans des revues scientifiques, des congrès nationaux et internationaux. Ils pourront avoir également un impact économique, un transfert technologique vers les industriels étant envisagé à moyen terme. Le projet devrait aboutir à de

nouvelles collaborations visant à l'industrialisation du procédé et à son imbrication dans les chaînes de fabrication de pièces. Ceci nous permettra bien évidemment de concourir au développement des collaborations de recherche partenariale avec les entreprises et également de pouvoir proposer des solutions plus proches de la réalité à nos partenaires surtout entreprise de notre région (notamment AXON'CABLE), pour accroître leur compétitivité, créer de la valeur et de l'emploi... De plus, cette étude a pour but de dégager les avantages des matériaux et procédés hybrides et de présenter, surtout aux fabricants français, notamment addup, BeAM ou IREPA LASER, une proposition concrète de collaboration future.

Ce projet permettra aux industriels de réaliser des pièces à l'unité sur mesures aux propriétés supérieures en faisant des économies d'énergie et donc en préservant l'environnement (gain au niveau des étapes de conception et de l'outillage mis en œuvre). De plus, il sera ainsi possible de réduire la charge environnementale au regard de la consommation de ressources, d'énergie (ou l'émissions de polluants). La réduction du poids des moyens de transports réduira la consommation du carburant ce qui réduit la pollution de l'environnement.

4. Moyens consacrés (matériel et encadrement du doctorant)

4.1 Matériel :

Ce projet s'appuie sur les moyens disponibles dans la plateforme technologique de fabrication additive au laboratoire LASMIS de l'ICD, ainsi que à l'EPF de Troyes :

- Diffraction des rayons X ; Caractérisations cristallographiques (Identification des phases, mesure des contraintes résiduelles, textures).
- Micro-machine de traction ; Caractérisations mécanique des matériaux.
- Rugosimètre 3D ; Mesure la rugosité et caractérise l'état de surface.
- Microduromètre et nanoindenteur: Module d'élasticité et dureté des matériaux.
- Microscope optique et MEB : Observation de microstructure et Caractérisations cristallographiques.

Nos plateformes sont également équipées de nombreuses technologies d'impression 3D :

- Une imprimante métallique Metal X par dépôt de fil fondu et un four de frittage
- Une stéréolithographie
- Une résine photosensible
- Une imprimante InkJet sur lit de poudre plâtre
- Une stratoconception
- Plusieurs imprimantes dépôts de fil chaud

4.2 Encadrement du doctorant :

Dès son arrivée, le doctorant pourra bénéficier de toutes les installations mises à disposition au sein des équipes de l'UTT, l'EPF et l'ENIS de U. Sfax.

- Par ailleurs, l'implication de chercheurs à la fois de l'EPF, l'UTT, ENIS de U. Sfax et des plateformes technologiques dédiées aux nouveaux procédés de fabrication additive métallique dans ce travail permettra au doctorant de bénéficier de compétences précieuses dans ce domaine.

- Des réunions hebdomadaires avec le doctorant et ses encadrants associées à des réunions de travail ponctuelles avec les différents partenaires impliqués dans le projet de thèse permettront au doctorant de s'approprier les différents outils qu'il mettra en œuvre.

- Il est à noter que dans les plateformes technologiques de l'EPF de l'UTT et ENIS de U. Sfax, des personnels dédiés sont responsables des différents équipements et forment sur place les doctorants en début de thèse afin que ces derniers deviennent autonomes rapidement sur ces machines. En outre, des modules proposés par l'Ecole Doctorale ainsi que des formations internes et externes (école d'été, formations spécifiques...) peuvent être suivis par le doctorant pour parfaire sa maîtrise des outils ou méthodes nécessaires à la mise en œuvre du travail de thèse.

- Le LASMIS possède par ailleurs différents équipements SMAT dont un est équipé d'un système de chauffage in-situ. Le doctorant pourra donc s'appuyer sur les nombreuses connaissances acquises par l'équipe sur ce procédé à l'UTT. En outre, ces travaux pourront s'appuyer sur les connaissances reconnues de l'EPF sur la fabrication additive. De plus, l'équipe de recherche Fabrication Mécanique du Laboratoire LMFAGPE de l'ENIS possède une expertise forte en procédé de fabrication, en particulier le calcul du temps et du coût de fabrication des pièces mécaniques.

5. Compétences et profil du candidat

Pour le (la) doctorant(e) : Diplômé d'un Bac+5 (ou équivalent) en Génie Mécanique, Génie Electro-mécanique ou Génie de Matériaux avec une formation solide en processus de fabrication, en métallurgie mécanique, avec un équilibre entre caractérisations microstructurales et caractérisations mécaniques.

L'étude ayant un caractère principalement expérimental en procédés et matériaux, et à fort potentiel de développement scientifique et d'application industrielle, le/la candidat(e) sera évalué(e) sur la base de son goût à l'expérimentation, sa rigueur et sa capacité à s'emparer de méthodes nouvelles. Bonnes capacités d'analyse, de synthèse, d'innovation et de communication. Une connaissance des modèles d'estimation des coûts de procédés de fabrication sera appréciable.

Bon niveau de pratique du français et de l'anglais (niveau B2 ou équivalent minimum). Qualités d'adaptabilité et de créativité. Motivation pour l'activité de recherche dans un contexte à fort enjeu industriel.

6. Références du directeur et co-directeur de thèse

Ci-dessous quelques références en lien direct avec le sujet proposé ;

6.1 Publications dans des revues internationales :

Q. Portella, **M. Chemkhi**, D. Reira. *Influence of Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT) post-treatment on microstructural, mechanical and tensile behaviour of additive manufactured AISI 316*, **Materials Characterization** 2020, Article soumis

C. Chang, X. Yan, R. Bolot, J. Gardan, S. Gao, M. Liu, H. Liao, **M. Chemkhi** & S. Deng, *Influence of post-heat treatments on the mechanical properties of CX stainless steel fabricated by selective laser melting*, **Journal of Materials Science** (2020) <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04566-x>

Y. Eyzat, **M. Chemkhi**, Q. Portella, J. Gardan, J. Remond, D. Reira. *Characterization and Mechanical Properties of As-Built SLM Ti-6Al-4V subjected to surface mechanical post-treatment*, **Procedia CIRP** Volume 81, 2019, Pages 1225-1229

Q. Portella, **M. Chemkhi**, D. Reira. *Residual Stresses Analysis in AISI 316L Processed by Selective Laser Melting (SLM) Treated by Mechanical Post-Processing Treatments*, **Materials Research Forum** 2018
doi:<http://dx.doi.org/10.21741/9781945291890-43>

M. Chemkhi, D. Reira, A. Roos, C. Demangel, *Role and effect of mechanical polishing on the enhancement of the duplex mechanical attrition/plasma nitriding treatment of AISI 316L steel*, **Surface & Coatings Technology** Volume 325, September 2017, Pages 454-461.

S. Chayoukhi, **Z. Bouaziz**, A. Zghal, *Cost estimation of joints preparation for GMAW welding process using feature model*, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol.199, Issues 1-3, pp. 402-411, 1 April 2008.

Z. Bouaziz, J. Ben Younes A. Zghal, *Cost estimation system of dies manufacturing based on the complex machining features*, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 28, N°3-4 pp. 262-271. Mars 2006.

6.2 Communications dans des colloques nationaux et internationaux :

Janv. 2020 : M. Saddouk, **M. Chemkhi**, J. Kauffmann, J. Gardan, D. Reira, *Effet de différents paramètres de fabrication additive sur les contraintes résiduelles et le comportement mécanique de pièces en acier inoxydable martensitique 17 4PH*, MécaMat2020, Janvier 20-24, 2020, **Aussois– France**.

Janv. 2020 : Q. Portella, **M. Chemkhi**, D. Reira. *Effet des contraintes résiduelles sur le comportement en fatigue de pièces en 316L obtenues par fusion laser sur lit de poudre (SLM)*, MécaMat2020, Janvier 20-24, 2020, **Aussois– France**.

Oct. 2019 : Q. Portella, **M. Chemkhi**, D. Reira. *Étude de l'effet d'un traitement de nanocristallisation superficielle sur des pièces en acier 316L réalisées par Fusion Laser sur lit de poudre*, JA2019, Octobre 21-23, 2019, **Paris– France**.

Sept. 2019 : Q. Portella, **M. Chemkhi**, D. Reira. *The effects of heat treatment carried out on mechanical properties of selective laser melted 316L stainless steel before or after mechanical post-treatment*, Euromat2019, September 01-05, 2019, **Stockholm - Suède**.

Août. 2019 : Q. Portella, **M. Chemkhi**, D. Reira. *Study of the effect of a superficial nanocrystallization treatment on the fatigue properties of Selective Laser Melted 316L Steel Parts*, CFM2019, Août 26-30, 2019, **Brest – France**.

Mai. 2019 : Q. Portella, **M. Chemkhi**, D. Reira. *Etude d'un acier 316L réalisé par SLM soumis à un traitement mécanique de surface (SMAT)*, Poudres2019, Mai 22-24, 2019, **Grenoble - France**.

Nov. 2018 : Q. Portella, **M. Chemkhi**, D. Reira. *Effect of Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT) on the mechanical properties of AISI 316L processed by Selective Laser Melting (SLM)*, Metal Additive Manufacturing Conference (MAMC2018), November 21-24, 2018, **Vienne, Autriche**.