

Titre de la thèse	Génération de trajectoires en temps semi-réel pour la fabrication additive WAAM à partir de mesures géométriques inter-couches in-situ.
Ecole Doctorale	ED548
Laboratoire	COSMER (EA7398)
Discipline	Mécanique solide, Génie mécanique, Productique, Transport et Génie civil
Directeur(s) de Thèse & Encadrant(s)	Vincent HUGEL 20%, PR Sébastien CAMPOCASSO 40%, MCF (HDR prévue en 2024) Maxime CHALVIN 40%, MCF

## Description du sujet de recherche

### Contexte :

La Fabrication Additive (FA) est en pleine expansion en raison des avantages offerts : fabrication rapide et agile (pas d'outillages), formes de pièces très complexes etc. Parmi les procédés de fabrication additive, le procédé WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*, dépôt de fil métallique à l'arc permettant la réalisation de la pièce par empilement et juxtaposition de cordons) présente un coût très faible et une bonne productivité pour la fabrication unitaire ou en petite série de pièces brutes de grandes dimensions (jusqu'à plusieurs mètres). Néanmoins, ce procédé est encore mal maîtrisé tant du point de vue de la qualité des matériaux que de la qualité géométrique. En effet, des défauts de forme locaux de l'ordre du millimètre résultent de la forme des cordons, tandis que la qualité géométrique et dimensionnelle globale est affectée par différentes causes : « dérive » de la pièce fabriquée au fil des couches, déformations liées aux contraintes internes issues de la solidification, dilatation thermique et défauts provenant de l'ensemble robotique utilisé. Pour de grandes pièces, ces défauts globaux peuvent atteindre plusieurs dizaines de millimètres et nécessitent donc d'être corrigés.

**Depuis 2017, le laboratoire COSMER de l'Université de Toulon développe des activités de FA robotisée** par dépôt de matériaux polymères (impression 3D FDM/FFF) ou métalliques, et s'est doté d'une cellule WAAM équipée d'un robot et d'un positionneur deux axes FANUC ainsi que d'un générateur de soudage FRONIUS CMT. Les travaux du laboratoire couvrent les thématiques de génération de trajectoires multi-axes [1-3], de mise au point de stratégies de dépôt [4-5], d'optimisation du pilotage de moyens multi-axes [6] ainsi que de l'intégration de capteurs pour le contrôle automatique in-situ [7] afin de tendre vers un procédé dit intelligent.

**Dans le cadre du Fonds innovation achats 2023, le laboratoire COSMER a obtenu le financement pour s'équiper d'une boucle de contrôle-correction** constituée d'un capteur de mesure géométrique sans contact (scan 3D par projection de lumière structurée et stéréovision) et d'une solution logicielle permettant l'acquisition du nuage de points, son traitement et l'envoi d'une trajectoire corrigée au contrôleur FANUC. Les données géométriques ainsi obtenues permettant de corriger la fabrication lors des étapes suivantes. **Le sujet de thèse proposé est relatif au déploiement de ces nouveaux moyens expérimentaux et au développement des algorithmes de traitement en**

**temps semi-réel** (entre deux couches déposées, soit quelques dizaines de secondes) des données mesurées pour calculer la trajectoire corrigée de la couche suivante. L'intégration du nouveau matériel va commencer dès le mois de mai 2024 dans le cadre d'un stage.

**Le travail de thèse sera réalisé en partenariat étroit avec la société I-MC** dans le cadre d'un contrat de collaboration couvrant les frais de fonctionnement. Cette PME, basée à Pertuis (84), est spécialisée dans le développement de solutions industrielles robotisées et commercialise notamment la solution CAM-RON de contrôle-correction de trajectoires d'usinage, basée sur deux brevets. Depuis 2022, I-MC propose également la solution CAM-RON FA dédiée au pilotage de procédés de fabrication additive robotisés directs tel que le WAAM ou WLAM (*Wire Laser Additive Manufacturing*) à partir de données issues du *monitoring* du procédé.

#### Originalité et pertinence par rapport à l'état de l'art :

Avant 2020, la plupart des études menées sur le WAAM ont consisté à réaliser des essais comportant un faible nombre de couches, visant à mettre au point la paramétrie de dépôt et analyser les caractéristiques du matériau obtenu. Quelques travaux, dont ceux de l'Université de Cranfield, ont néanmoins cherché à fabriquer des pièces représentatives des échelles industrielles et mis en lumière les verrous à lever.

Récemment, des travaux ont montré qu'il était possible d'utiliser un capteur à lumière structurée pour vérifier la capabilité géométrique d'un brut obtenu par WAAM (surépaisseurs d'usinage suffisantes) [8] ou de réaliser un balançage numérique du brut [9]. D'autres auteurs [10] ont proposé d'utiliser un scan 3D obtenu en cours de fabrication pour modifier la suite des opérations. Dans ce dernier cas, le scan a été réalisé manuellement avec un bras de mesure équipé d'un capteur laser et la correction consiste à générer des trajectoires pour compléter les manques de matière pour revenir dans un état permettant de relancer le programme prévu initialement.

La présente proposition se distingue des travaux existants sur deux points. Le premier point est que le calcul de la trajectoire de chaque couche est réalisé en temps semi-réel à partir de la mesure des couches précédentes, durant le temps de refroidissement entre deux couches (calcul en temps « semi-réel » sur quelques dizaines de secondes). Cette approche s'insère dans la démarche « couche par couche » retenue par le laboratoire COSMER, incluant par exemple le changement de configuration articulaire entre deux couches [6]. Le deuxième point consiste à utiliser l'architecture logicielle STEP-NC (*Feature Based CNC Controller*) [11], retenue notamment par I-MC dans CAM-RON, dans le but d'avoir une boucle de contrôle-correction ne dégradant pas la chaîne numérique.

#### Objectifs :

L'objectif principal de la thèse est de mettre en place un démonstrateur de boucle de contrôle-commande géométrique inter-couches, avec un scan avant chaque couche et le calcul en temps semi-réel de la couche suivante garantissant une hauteur de couche constante et un défaut géométrique minimal ; le tout dans une architecture STEP-NC. Différents algorithmes de calcul pourront être développés au cours de la thèse et devront être quantifiés en termes de temps de calcul, de qualité géométrique et dimensionnelle de la pièce produite. Une comparaison des résultats obtenus permettra in fine des recommandations pour la solution industrielle.

#### Méthodes :

Au cours de la première année de thèse, le doctorant devra réaliser un état de l'art relatif à la fabrication WAAM, au format STEP-NC et aux méthodes de correction de trajectoires basées sur des mesures. Il sera également en charge de l'intégration et de la mise en route de la boucle de contrôle-correction dans une configuration simplifiée avec des essais préliminaires permettant d'estimer les performances de numérisation. Durant la deuxième année, le doctorant travaillera au développement des algorithmes de calcul de trajectoires en temps semi-réel et sur leur validation expérimentale. La troisième année sera dédiée à la finalisation des travaux et à la rédaction.

#### Retombées attendues :

Les travaux de thèse devront être valorisés sous forme de publications et communications scientifiques, avec au minimum : un article dans un journal international de rang A (tel que *Robotics and Computer Integrated*

Manufacturing), une conférence internationale (CIRP CAT par exemple) et une présentation dans des événements nationaux (Conférence Manufacturing'21 ou Colloque S.mart).

Mots clés : Fabrication additive ; WAAM ; Robotique industrielle ; Trajectoires ; Métrologie ; Numérisation 3D

#### Références :

- [1] M. Chalvin, S. Campocasso, T. Baizeau, V. Hugel. *Automatic multi-axis path planning for thinwall tubing through robotized wire deposition*. Proc CIRP, Vol. 79, pp. 89-94, 2019.
- [2] M. Chalvin. *Fabrication additive de tubulures par dépôt de fil robotisé multi-axes: génération et optimisation de trajectoires*. Thèse de doctorat, Université de Toulon, 2020.
- [3] S. Campocasso, M. Chalvin, U. Bourgon, V. Hugel, M. Museau. *Manufacturing of a Schwarz-P pattern by multi-axis WAAM*. CIRP Annals, Vol. 72/1, pp. 377-380, 2023.
- [4] S. Campocasso, M. Chalvin, A.-K. Reichler, R. Gerbers, K. Dröder, V. Hugel, F. Dietrich. *A framework for future CAM software dedicated to additive manufacturing by multi-axis deposition*. Proc CIRP, Vol. 78, pp. 79-84, 2018.
- [5] A. Claude, S. Campocasso, M. Chalvin, M. Demésy. *Méthode de qualification de stratégies de fabrication pour l'obtention de murs épais en WAAM* (10 p.). Conférence nationale Manufacturing'21, Saclay (France), 2022.
- [6] M. Chalvin, S. Campocasso, V. Hugel, T. Baizeau. *Layer-by-layer generation of optimized joint trajectory for multi-axis robotized additive manufacturing of parts of revolution*. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 65, 101960, 11 pages, 2020.
- [7] M. Chalvin, A. Claude, S. Campocasso, V. Hugel. *Gestion de la température couche-par-couche pour la fabrication additive WAAM* (10 p.). Conférence nationale Manufacturing'21, Online (France), 2021.
- [8] J. Dvorak, A. Cornelius, G. Corson, R. Zamoski, L. Jacobs, J. Penney, T. Schmitz. *Machining considerations for waam preforms*. ASPE 36th Annual Meeting, Minneapolis, 2021.
- [9] A. Cornelius, J. Dvorak, L. Jacobs, J. Penney, T. Schmitz. *Combination of structured light scanning and external fiducials for coordinate system transfer in hybrid manufacturing*. J Manufacturing Processes, 68, 1824-1836, 2021.
- [10] P.M. Bhatt, Z. McNulty, S.K. Gupta. *Robot trajectory generation for multi-axis wire arc additive manufacturing*. In ASME MSEC2022, Vol. 85802, p. V001T01A032, 2022.
- [11] R. Bonnard. *Proposition de chaîne numérique pour la fabrication additive*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2010.

## **Encadrement et conditions matérielles pour le doctorant**

Le doctorant disposera d'un ordinateur portable équipé des logiciels nécessaires et d'un bureau dans les locaux du département GMP de l'IUT de Toulon, où sont localisés les équipements expérimentaux et les encadrants. Après une formation, il aura accès au matériel de manière autonome, mais pourra ponctuellement solliciter le personnel technique pour la réalisation de dispositifs expérimentaux. Des réunions avec la société partenaire seront organisées 3 à 4 fois par an. Un Comité de Suivi Individuel (CSI) sera organisé à chaque fin d'année, conformément au règlement de l'école doctorale.

## **Compétences attendues et personnes à contacter**

**Compétences attendues** : Diplômé d'une école d'ingénieurs ou d'un master à dominante mécanique, vous avez des bases en fabrication mécanique, métrologie, géométrie, CFAO et robotique industrielle ou machines-outils. Rigoureux et doté de bonnes aptitudes de communication, le candidat devra être sensible aux préoccupations industrielles et avoir un goût prononcé pour les réalisations expérimentales.

#### **Personne(s) à contacter :**

M. Sébastien CAMPOCASSO, +33-(0)494142360, [sebastien.campocasso@univ-tln.fr](mailto:sebastien.campocasso@univ-tln.fr)

M. Maxime CHALVIN, +33-(0)494142360, [maxime.chalvin@univ-tln.fr](mailto:maxime.chalvin@univ-tln.fr)