

Monitoring in-situ et contrôle en boucle fermée des procédés LMD-p et WAAM.

Les procédés de fabrication additive métallique reçoivent un intérêt certain de la part des industriels car ils permettent de répondre à des défis fondamentaux liés à l'évolution de la demande (personnalisation, réduction des assemblages, canaux internes gauches, réduction de masse, réparation...).

Cependant ces procédés sont encore jeunes et souffrent d'un manque de fiabilité pour atteindre les standards industriels d'une production automatisée de pièces de haute qualité de série unitaire à plus volumineuse. En effet, la maîtrise de l'état résiduel des pièces ainsi produites (géométrie, porosité, composition chimique de l'alliage après fusion, microstructure, contraintes résiduelles, etc) reste très relative du fait de la physique très complexe mise en jeu lors de la fabrication. Il en résulte des étapes de post-traitements indispensables mais ceux-ci limitent l'utilisation de ces technologies dans un cadre économiquement viable.

Une des voies d'amélioration réside dans l'optimisation des paramètres de consigne des procédés. Pour cela, il est nécessaire d'agir sur différents leviers :

- Réglage avant la fabrication des paramètres de consigne (apport d'énergie, apport de matériau, vitesse de balayage, trajectoires...) . Une des pistes d'optimisation réside dans l'utilisation de logiciel de Fabrication Assistée par Ordinateur. Cela nécessite la mise en place de méthodes numériques précises et rapides permettant de simuler l'histoire thermomécanique en chaque point des pièces pendant la fabrication.
- Correction des paramètres de consigne en cours de fabrication compatible avec le temps caractéristique du procédé nécessitant :
 - La mise en place de mesures in-situ multi-modales aux différentes échelles caractéristiques du procédé.
 - La mise en place d'une boucle de rétroaction via la détection des déviations entre l'état prédit par le jumeau numérique et les données du monitoring du procédé ; et via la correction des paramètres de consigne au moyen de cartes de corrélation entre des indicateurs issus du monitoring et les paramètres de consigne ajustables en cours de fabrication.

Parmi les procédés de fabrication additive métallique, les procédés « freeform » de dépôt de matière sous flux concentrée (Directed Energy Deposition) offrent des taux de dépôt de matière importants et sont moins limités en taille de pièce que les procédés basés sur la fusion sur lit de poudre.

Dans le cadre du **projet ANR METALIC** (Fig.1), les laboratoires LaMCoS (INSA-LYON) et GSCOP (Grenoble INP) travaillent à la mise au point de la chaîne numérique explicitée ci-dessus pour deux technologies différentes de DED.

Le LaMCoS dispose d'une machine ouverte de LMDp (powder laser metal deposition) qui consiste en la projection de poudre métallique dans un bain fondu localement par une source laser focalisée. La pièce est ainsi fabriquée couche par couche par balayage de la buse à l'aide d'un robot 6 axes. Ce procédé est adapté à la réparation de pièces ou encore à l'ajout de fonction volumique sur une pièce existante. Il permet aussi par mélange de poudre d'obtenir des matériaux à gradient d'alliages métalliques ou des composites à matrice métallique.

Le GSCOP dispose d'une machine ouverte de WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) qui consiste en un dépôt de matière par fusion d'un fil métallique par arc électrique. La pièce est fabriquée couche par couche par balayage de la buse de travail à l'aide d'un robot 6 axes. Ce procédé permet les taux de dépôt de matière les plus importants ce qui ouvre la possibilité de réaliser des pièces de grande dimension avec des contraintes HSE beaucoup moins élevées que les procédés basés sur des poudres.

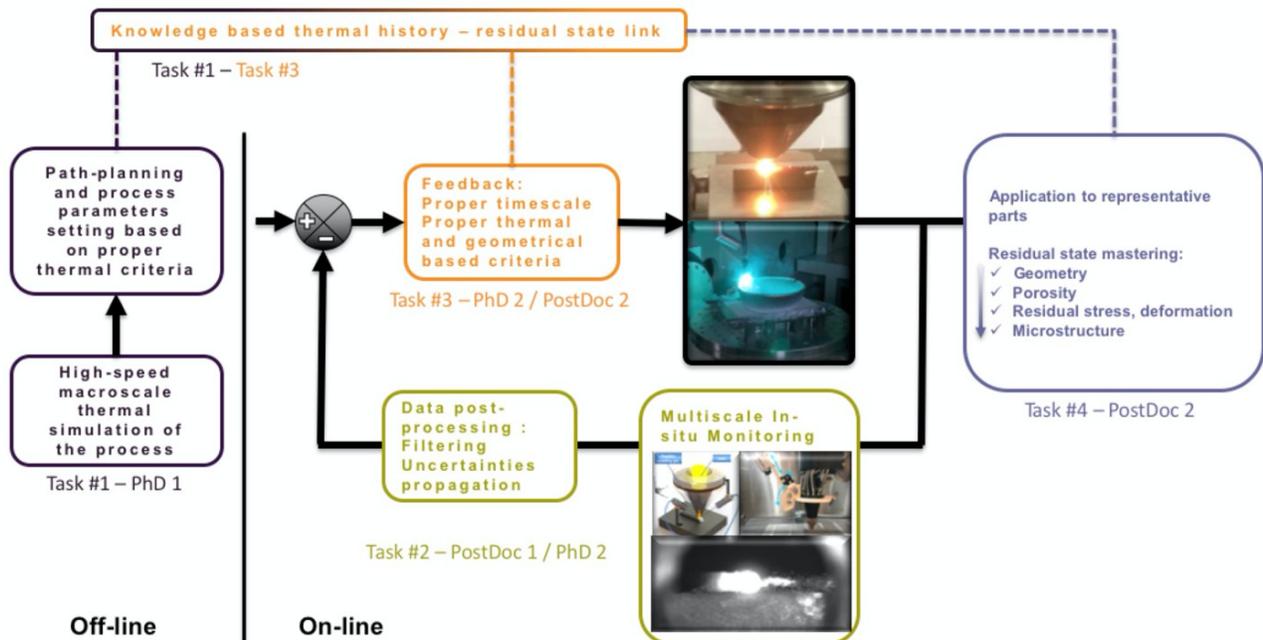


Fig.1 : Projet ANR METALIC

La thèse proposée s’inscrit dans l’optimisation du contrôle in-situ des procédés LMDp et WAAM.

Le premier axe de recherche constitue la **mise au point de techniques de monitoring in-situ multimodales** adaptées aux différentes échelles spatiales et temporelles des deux procédés :

- Mise en place d’un monitoring permettant de caractériser la stabilité thermique et géométrique du bain fondu, la morphologie du cordon ainsi que les gradients thermiques dans la pièce et les déformations de la pièces en cours de fabrication.
- Optimisation du traitement des données mesurées : compresser les données en des indicateurs fiables et efficaces de l’état résiduel (stabilité thermique locale, stabilité de la morphologie du bain fondu, stabilité de la hauteur de couche ou de la forme du cordon) ; Réduire le temps de traitement des données ; fusionner des données venant de différentes sources ; étudier la propagation des incertitudes pour l’utilisation des données dans le cadre d’une boucle fermée.
- Évaluation des solutions en terme d’efficacité vis-à-vis de différents critères : précision (justesse, fidélité), résolution spatiale, compatibilité du temps d’acquisition et de traitement avec une utilisation en ligne, sensibilité des indicateurs de l’état résiduel à la déviation du procédé, facilité de mise en œuvre.

Le deuxième axe consiste à utiliser les moyens de monitoring à des fins de validation des développements en Fabrication Assistée par Ordinateur en mettant en place des outils de **dialogue essais/calculs**.

Le troisième axe consiste en l'implémentation de l'architecture de **contrôle en boucle fermée sur le procédé LMDp**.

La thèse dont l'objectif majeur est la mise au point de techniques de monitoring efficaces sera réalisée en lien étroit avec deux autres thèses, l'une s'attachant au développement des méthodes numériques nécessaires à la Fabrication Assistée par Ordinateur, l'autre s'attachant au développement de l'architecture de contrôle en boucle fermée. Le candidat, localisé à Lyon, sera amené à réaliser plusieurs campagnes d'essais à Grenoble dans le cadre de la mise au point du monitoring sur la technologie WAAM.

Encadrement :

Thomas Elguedj	LaMCoS	directeur de thèse	thomas.elguedj@insa-lyon.fr
Frédéric Vignat	GSCOP	co-directeur	frederic.vignat@grenoble-inp.fr
Nicolas Tardif	LaMCoS	co-encadrant	nicolas.tardif@insa-lyon.fr
Mady Guillemot	LaMCoS	co-encadrante	mady.guillemot@insa-lyon.fr
Joel Lachambre	LaMCoS	co-encadrant	joel.lachambre@insa-lyon.fr