



SEMINAIRE

Fabrication Additive métallique

26 Novembre 2019



Contrôle Procédé du Laser Beam Melting par la détection infrarouge des défauts de stabilité du bain de fusion : application aux alliages TA6V et 15-5PH

Bastien FOSSE^a, Christophe COLIN^a, Jean-Dominique BARTOUT^a, Lyliat FERHAT^a, Pierre VINSON^b

^aMines ParisTech - Centre des Matériaux, Corbeil-Essonnes, 91100 - France

^bERPRO Group - Saint-Leu-la-Forêt, 95320 - France

La technologie de fusion sélective par laser de lits de poudre (Laser Beam Melting) connaît un essor considérable qui amène les fabricants de machines à des développements visant à une meilleure fiabilité industrielle du procédé. Parmi ces développements, le monitoring local est adopté et commercialisé par nombre de constructeurs. Ce monitoring fait notamment usage de dispositifs équipés de photodiodes et de caméras rapides travaillant dans le visible. Les choix de ces dispositifs ont été guidés par la nécessité de contrôler un phénomène rapide faisant intervenir des fréquences d'acquisition de l'ordre de la dizaine de kilohertz. Néanmoins ces dispositifs n'apportent aucune information quantitative, notamment en température.

Pour comprendre la stabilité du procédé et plus particulièrement les phénomènes qui interviennent lors de la fusion du matériau et de sa solidification, il est alors essentiel d'apporter une information quantitative des champs thermiques locaux pour ces mêmes gammes de fréquences d'acquisition. C'est pourquoi, dans le cadre du projet FUI21 « PALOMA », un dispositif de caméra rapide travaillant dans le domaine infrarouge, un étalon de température et une routine de traitement des images ont été mis au point et implantés sur une machine LBM du Centre des Matériaux de Mines-ParisTech, afin d'observer la stabilité du bain de fusion et de détecter les défauts associés. Aussi, il est important de pouvoir traiter rapidement à la volée les images captées par la caméra thermique (balling, humping, pores de type keyhole...). Cette détection permettrait à terme de réduire l'apparition de défauts par au choix, un monitoring ou contrôle process en temps réel.

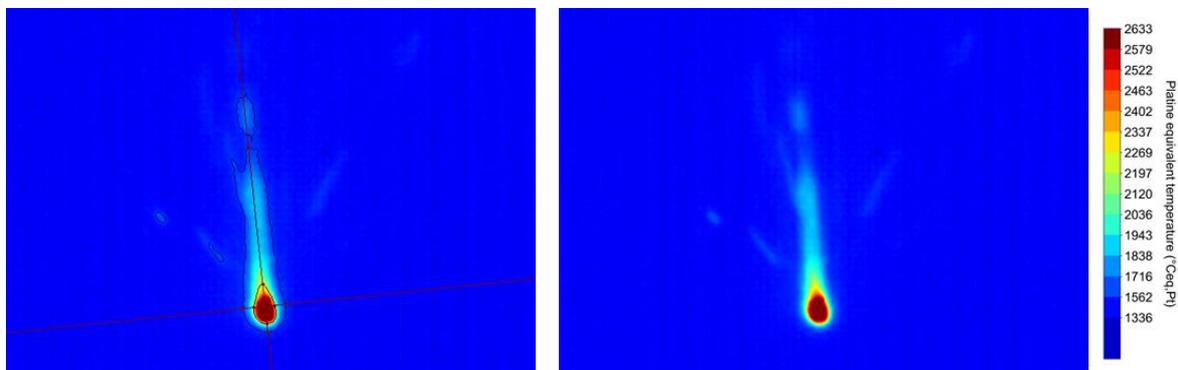


Figure : Observation du bain de fusion et d'un défaut de stabilité (balling)

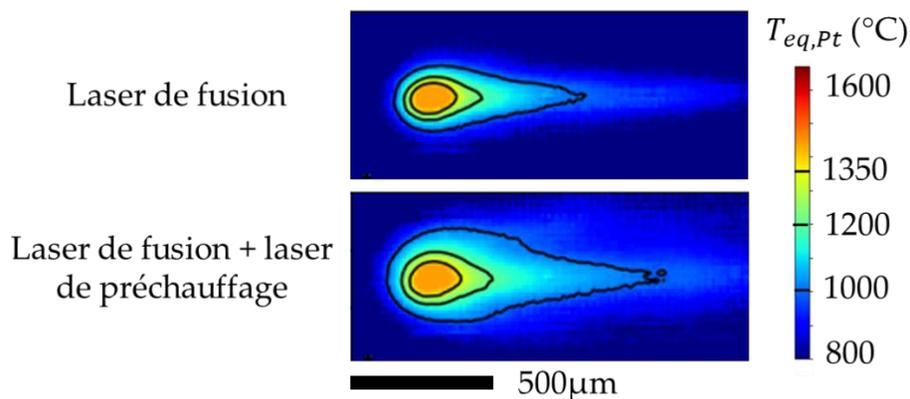
Mise en forme par Laser Beam Melting de superalliages base nickel difficilement soudables

David GRANGE^{a, b}, Jean-Dominique BARTOUT^a, Bruno MACQUAIRE^b, Lyliat FERHAT^a,
Christophe COLIN^a

^aMines ParisTech - Centre des Matériaux, Corbeil-Essonnes, 91100 - France

^bSafran Additive Manufacturing, Magny-les-Hameaux 78114 - France

L'Inconel 738 est un superalliage base nickel composé d'une matrice austénitique γ renforcée par une haute fraction volumique de précipités γ' - Ni₃ (Al,Ti). Cette dernière lui confère des propriétés mécaniques intéressantes à haute température mais complique également sa mise en forme par LBM. Soumis à des gradients thermiques importants, cet alliage peut fissurer lors de la construction ou du traitement thermique ultérieur. A l'instar de ce matériau, la catégorie des superalliages base nickel dit *difficilement soudables* demeure en grande partie inéligible à une fabrication par LBM. Dans ces travaux, la fabrication et l'analyse d'échantillons en Inconel 738 a révélé la présence de fissures microscopiques après la fabrication. Ces fissures apparaissent lors de la solidification du matériau : leurs propriétés et conditions de formation ont été étudiées. Grâce à un plan d'essais, la dépendance entre les paramètres de fabrication, la forme des bains de fusion et l'occurrence des fissures a été mise en évidence. Ceci a permis la fabrication d'une éprouvette avec un niveau de fissuration minimal. Afin de diminuer encore les contraintes internes, une solution possible consiste à préchauffer la zone périphérique au bain de fusion à l'aide d'un second faisceau laser de plus grand diamètre, appelé laser de préchauffage. Des premiers essais d'utilisation d'un laser de préchauffage pour réduire le gradient thermique local sans fondre la poudre seront présentés.



Exemples de champs thermiques du bain de fusion
avec et sans faisceau laser de préchauffage (vue du dessus)

Maitrise de la métallurgie cible d'un superalliage base nickel élaboré par LBM : contrôle du champ thermique

*Luc LACOSTE^{a,b,c}, Christophe COLIN^a, Jean-Dominique BARTOUT^a, Lyliat FERHAT^a, Sébastien
LEBEL^c*

^aMines ParisTech - Centre des Matériaux, Corbeil-Essonnes, 91100 – France

^bAdditive Factory Hub (AFH), Saclay 91400 - France

^cSociété AddUp, Cébazat 63118 - France

Dans un but permanent de réduire les étapes de développement des pièces, les coûts et délais, de la chaîne de fabrication d'une pièce l'industrie mécanique place, depuis quelques années, de grands espoirs dans les techniques de fabrication additive. Toutefois, certains aspects sont encore mal maîtrisés et mal compris, comme par exemple le développement de la microstructure dans des conditions sévères de gradients thermiques et de vitesses de solidification pour le procédé de fusion laser sélective (Laser Beam Melting, LBM) de lits de poudre. En effet, l'introduction d'une source de chaleur mobile à la surface d'un milieu granulaire entraîne bien souvent une hétérogénéité microstructurale (mélange de grains colonnaires et équiaux). A ces hétérogénéités microstructurales sont associées des textures cristallographiques qui influencent le comportement mécanique des pièces.

La fabrication couche par couche d'une pièce saine demande donc de maîtriser les phénomènes thermiques par le choix adéquat d'une stratégie de balayage, d'un taux de recouvrement entre cordons ou par l'emploi d'un plateau chauffant, voire d'une seconde source de chaleur en arrière du bain. En particulier, les dilutions d'une couche sur l'autre et le volume refondu entre deux cordons côte à côte pilotent en grande partie la structure de grains d'une pièce brute de SLM. Les recuits successifs liés à la superposition des couches sont bien souvent à l'origine d'un partiel retour à l'équilibre thermodynamique des phases. Dans le cas d'alliages industriels de type superalliage base nickel, ces recuits successifs peuvent s'accompagner d'une précipitation d'intermétalliques indésirables ou de phases durcissantes non conventionnelles, voire d'une diminution de la densité de dislocations engendrées lors de la fabrication et d'une modification de la taille et de la morphologie des grains. Tout ceci n'est pas sans conséquence sur le détensionnement et/ou la fissuration des pièces, défaut rédhibitoire des superalliages. Un tel défaut peut conduire à des rebuts de pièces et donc à l'encontre d'une logique de production industrielle. Additive Factory Hub (AFH) a été inaugurée le mardi 5 décembre 2017 et situé à Digiteo-Saclay (centre CEA Paris-Saclay).

La plateforme AFH est en charge de structurer l'écosystème industriel en fabrication additive autour des acteurs de la recherche du Campus Paris-Saclay et de l'Île-de-France pour répondre aux enjeux industriels et économiques majeurs qu'elle implique. Les membres et partenaires d'Additive Factory Hub sont : AddUp, Air Liquide, AREVA NP, Arts et Métiers ParisTech, CEA, CETIM, CNRS, Dassault Systèmes, ENS Paris-Saclay, EDF, LNE, MINES ParisTech, Onera, Poly-Shape, Safran, SystemX, Université Paris-Saclay, Université Paris-Sud, Vallourec.

Etude de l'apport de matière par le procédé LMD (Laser Metal Deposition)

*Elise FERREIRA^{a,b,c}, Patrice PEYRE^a, Morgan DAL^a, Christophe COLIN^b, Damien COURAPIED^c,
Guillaume MARION^c*

^aLaboratoire PIMM, UMR 8006 ENSAM – CNRS – CNAM, HESAM Université - France

^bMines Paristech - Centre des Matériaux, Corbeil-Essonnes, 91100 - France

^cSafran Additive Manufacturing, Magny-les-Hameaux 78114 - France

Le LMD, pour Laser Metal Deposition, est un procédé de fabrication additive par dépôt de matière. Ce dernier met en œuvre l'interaction entre un faisceau laser et un jet de poudre métallique, et permet la construction ou l'ajout de fonctions sur pièces neuves ainsi que la réparation locale de pièces usées en service. L'une des difficultés principale de ce procédé réside dans le nombre conséquent de paramètres influençant la taille, la stabilité et le rendement des dépôts réalisés. De nombreuses études ont cependant souligné l'importance d'une connaissance approfondie du comportement du jet de poudre engendré par la buse de projection et ses différents flux de gaz sur la maîtrise des dépôts. Les travaux évoqués lors de ce séminaire se concentrent ainsi sur l'analyse numérique et expérimentale du comportement de l'apport de matière formé par trois designs de buse différents.

Pour cette étude, un modèle numérique simplifié a été développé sur COMSOL Multiphysics afin de prédire le comportement du mélange gaz/particules à partir des trois buses. De par la forme conique de ces dernières, un modèle 2D axisymétrique a été utilisé, comprenant un couplage faible entre la phase gazeuse et la phase pulvérulente formée par les particules d'inconel 718. Les résultats obtenus soulignent un impact non négligeable de la géométrie des buses ainsi que des débits de gaz et de poudre sur le comportement du jet.

Par ailleurs, une analyse expérimentale approfondie du jet de poudre a été menée à l'aide d'observations coaxiales et latérales par caméras rapides. Ces dernières ont permis de remonter à la forme, au diamètre, à la distribution de poudre ainsi qu'au plan focal du jet de particules, qui semblent s'accorder avec les résultats numériques. Une étude de l'atténuation du faisceau laser par le nuage de poudre précédemment caractérisé a également permis de mettre en avant l'influence de la distance de travail et des débits qui régissent le jet, par rapport à la puissance du laser qui n'a qu'un faible impact. L'ensemble de ces analyses fournissent donc une meilleure connaissance de l'apport de matière du procédé.

La fabrication additive de pièces de grandes dimensions à Naval Group

Antoine QUEGUINEUR^a, Guillaume RÜCKERT^a, Patrice VINOT^a

^aNaval Group Research, Bouguenais 44340 - France.

Pour la construction neuve et la maintenance de navires de combat et d'équipements pour l'énergie, Naval Group a identifié des applications variées pour les procédés de fabrication additive, en tenant compte des spécificités de ces applications (équipements de grandes dimensions, conditions d'utilisation sévères, effet de série limité et contraintes économiques fortes).

Parmi les solutions retenues, le procédé de dépôt de fil métallique (souvent appelé WAAM pour Wire Arc Additive Manufacturing) répond favorablement, pour des ébauches de grandes dimensions, aux produits tels que des hélices ou des équipements structuraux. L'accès à cette technologie prometteuse est relativement immédiat à partir des compétences et moyens du groupe dans le domaine de la métallurgie et du soudage. Des équipements sur mesure sont désormais installés en production.

Pour autant, des verrous technologiques peuvent apparaître pour la fabrication de pièces de géométrie complexe ; définition de trajectoires optimisées, gestion de la température en cours de dépôt, maîtrise des déformées et des propriétés, développements de solutions de parachèvement et de contrôles...

L'exposé propose, au travers de premières expériences à Naval Group, une présentation des possibilités offertes par le procédé de fabrication additive par dépôt fil pour des applications de grandes dimensions. Il donne également un inventaire des solutions en cours de développement pour profiter pleinement de ce nouvel outil industriel et des technologies afférentes.

Fabrication additive indirecte de pièces mécaniques navigables en 316L par Metal Binder Jetting

Benjamin SANGOUARD ^{a,b}, Christophe COLIN^a, Jean-Dominique BARTOUT^a, Denis MESSAGER^b

^aMines Paristech - Centre des Matériaux, Corbeil-Essonnes, 91100 – France

^bJPB Système, Montereau-sur-le-Jard 77950 - France

La fabrication additive métallique est de plus en plus utilisée par l'industrie aéronautique pour sa capacité à produire plus rapidement des pièces à géométrie complexe que les moyens de production standards (i.e tournage, décolletage).

Le Metal Binder Jetting (MBJ), à la différence du Laser Powder Bed Fusion (LPBF), est un procédé indirect de fabrication additive qui se prête bien à la réalisation d'une petite série de pièces. Basé sur un lit de poudre métallique, ce procédé consiste à projeter et sécher un liant venant lier les particules de poudre entre elles sur une épaisseur de couche d'une cinquantaine de microns. Cette étape se répète à chaque couche et constitue la phase d'impression de la série de pièces visées. Une fois l'impression terminée, la « box » contenant les pièces imprimées noyées dans la poudre est placée dans un four pour réticuler le polymère et rendre les pièces manipulables pour le dépoudrage. Les pièces sont ensuite mises dans un second four pour réaliser à la fois le déliantage et le frittage, visant respectivement à supprimer le polymère, et à densifier les pièces.

Dans ces travaux de thèse, nous nous proposons d'identifier la physique derrière chacune des étapes du procédé (Impression + Séchage, Déliantage et Frittage) afin d'établir des modèles cinétiques et ainsi intégrer ce procédé de Metal Binder Jetting dans une chaîne de production classique en contrôlant l'influence des paramètres du procédé sur les propriétés finales des pièces. La présentation aura pour objectif d'identifier les problèmes liés à chacune des étapes du procédé, de faire le lien entre deux étapes successives et d'exposer les résultats des premiers essais.

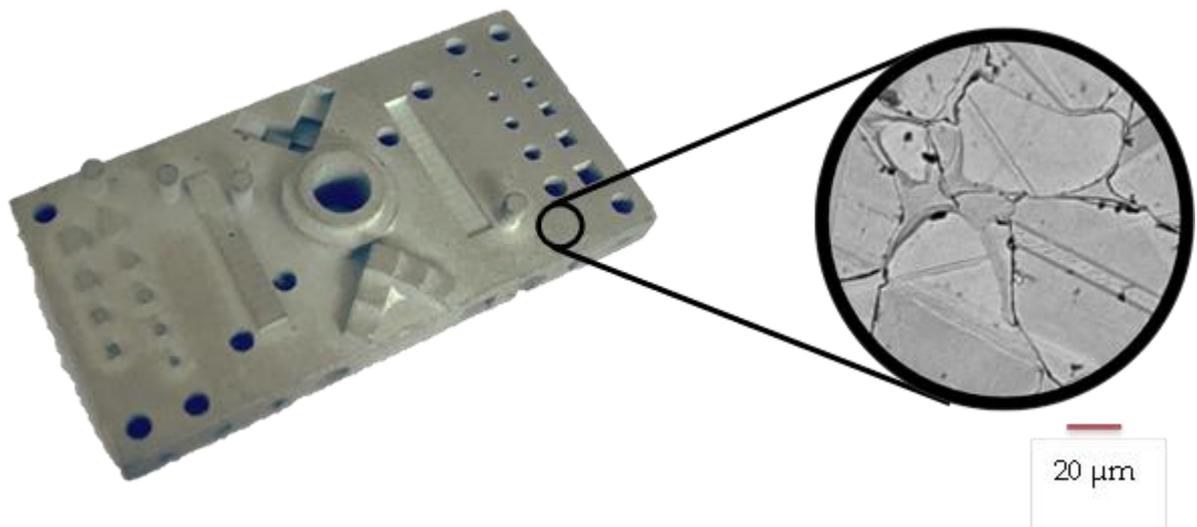


Figure : Pièce de démonstration en 316L réalisée par Metal Binder Jetting sur machine ExOne après un frittage partiel

Chaînage des procédés Cold Spray et Laser Beam Melting pour la fabrication de superalliages base nickel

Cléa PLOUZE^a, Vincent GUIPONT^a, Antoine DEBRAY^a, Lyliat FERHAT^a

^aMINES ParisTech – PSL Research University, Centre des matériaux, Evry, France,

Le procédé cold spray (CS) consiste à projeter des poudres métalliques à vitesse supersonique sur un substrat pour la formation à l'état solide de revêtements épais, denses et très peu oxydés. Grâce à une vitesse de construction élevée et un jet de matière localisé, le cold spray permet la réparation de pièces et émerge actuellement en fabrication additive. Il entraîne des microstructures particulières avec des déformations plastiques sévères. Le procédé Laser Beam Melting (LBM) de fabrication additive par fusion sur lit de poudre permet lui une très grande précision dimensionnelle pour la fabrication de pièces, mais au prix d'un temps de fabrication beaucoup plus élevé. Le LBM fait appel à la matière à l'état liquide avec fusion-solidification de poudres. Le chaînage de deux procédés, l'un « froid » et l'autre « chaud », qui utilisent le même type de poudre a pour objectif de combiner leurs avantages respectifs. Ceci est illustré à travers l'étude de plateaux de fabrication additive LBM par cold spray. En effet, les plateaux de fabrication qui conduisent toute la chaleur produite par le procédé LBM aux premiers stades de construction sont sensibles aux effets de matière et de contraintes résiduelles. Une composition homogène avec le matériau LBM est préférable pour éviter la fissuration à la liaison avec le plateau en raison des différences de dilatations thermiques. Le choix d'une couche épaisse cold spray sur un substrat d'une autre nature permettrait d'être plus flexible pour la fabrication de plateaux homogènes. Dans cette étude, le cold spray et le LBM sont appliqués à l'Inconel 738LC, superalliage base nickel utilisé dans la fabrication d'aubes de turbine. L'Inconel 738LC est peu ductile et permet d'étudier la particularité des mécanismes de construction et de déformation à l'origine du procédé cold spray pour ce matériau. Différents paramètres de projection cold spray (pression, température) sont mis en œuvre pour étudier les dépôts d'Inconel 738LC (Interface, épaisseur, rugosité, porosité, microstructure) qui sont comparés avec des dépôts de Ni pur beaucoup plus ductile. Ces dépôts sont également soumis à des essais de LBM pour étudier dans un premier temps, l'évolution du dépôt en présence du laser (zone de dilution et ZAT).

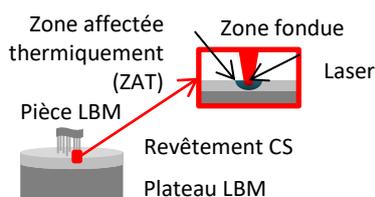


Figure 1.
Concept
d'un
plateau
LBM revêtu
Cold Spray.

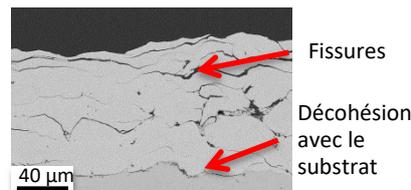


Figure 2.
Image MEB
(électrons
rétrodiffusés)
– Dépôt Cold
Spray.

Analyse de la nocivité des défauts de fabrication additive par LBM sur la propagation de fissure de fatigue

Mélanie THEVENEAU^a, Alain KÖSTER^a, Djamel MISSOUM-BENZIANE^a, Jean-Dominique BARTOUT^a, Lyliat FERHAT^a, Vincent MAUREL^a

^aMines Paristech - Centre des Matériaux, Corbeil-Essonnes, 91100 - France

La fabrication additive (FA), et notamment la fabrication par lit de poudre (Laser Beam Melting / LBM) est un procédé mature pour certains matériaux, dont certains superalliages base nickel faiblement chargés, dont l'usage est très répandu dans l'industrie aéronautique. Malgré des paramètres procédés optimisés, il subsiste des défauts tels que des hétérogénéités microstructurales que l'on peut homogénéiser par des traitements thermiques, ou une porosité qu'un traitement de type pression hydrostatique à chaud (HIP) peut réduire efficacement. Or ces étapes sont lourdes et coûteuses. L'enjeu de cette étude est donc de comprendre comment une pièce obtenue par LBM, pour des conditions optimisées de procédé, peut "vivre" avec une population de défauts résiduels. Ces derniers peuvent être de plusieurs natures, (retassures, pores gazeux, infondus, fissuration à chaud, défaut de recouvrement...) et sont le plus souvent liés à différents paramètres procédés plus ou moins inter-corrélés. Dans cette étude, les défauts étudiés sont les pores. Il est tout d'abord nécessaire de caractériser et de modéliser les propriétés de ces pièces en fonction de la population de défauts résiduels. Afin de comprendre au mieux les interactions entre les propriétés en fatigue et le réseau de défauts, nous privilégions une caractérisation en propagation de fissure de fatigue.

Notre étude porte sur l'Inconel 718, matériau très répandu dans le domaine aéronautique qui allie bonnes propriétés mécaniques et disponibilité à faible coût pour la fabrication additive. L'étape initiale de ce projet consiste à établir une microstructure optimale et une microstructure dégradée en agissant sur les paramètres de fabrication. Des essais d'érouissage cyclique à haute température pour différentes orientations de construction ont permis de mettre en évidence l'anisotropie du matériau, remarquable sur le module d'Young ainsi que sur l'érouissage. Enfin, le rôle des défauts sur la propagation de fissure est étudié à l'aide d'observations au microscope *in situ* en cours d'un essai de propagation de fissure sur le matériau à l'état dégradé à haute température. On constate alors que l'avancée de fissure est pilotée par des micro-amorçages de fissures sur les défauts en amont proches de la fissure principale.

Simulation numérique du procédé LBM à l'échelle des cordons et validation expérimentale

Michel BELLET^a

^aMines ParisTech – CEMEF, UMR CNRS 7635, Sophia Antipolis

Présentation des grandes lignes de la simulation numérique du procédé LBM (Laser Beam Melting) à l'échelle des cordons élémentaires. Un focus sera fait sur la validation expérimentale.

Prévision de l'état résiduel et microstructural pour la fabrication additive par dépôt de fil métallique à l'arc

Sami HILAL^{a,b}, Sofiane HENDILI^b, Djamel MISSOUM-BENZIANE^a, Pierre KERFRIDEN^a,
Matthieu MAZIERE^a

^aMines Paristech - Centre des Matériaux, Corbeil-Essonnes, 91100 - France

^bEDF R&D, Département PRISME, Chatou 78400 - France

Les procédés de fabrication additive par dépôt de fil métallique tel que le procédé WAAM (« Wire and Arc Additive Manufacturing ») sont en plein essor car ils proposent des taux de dépôt de matière très élevés et minimisent les problématiques HSE liées à l'exploitation de poudres métalliques. Si ce procédé issu du soudage est bien connu, son exploitation sur des cellules robotisées pour fabriquer des pièces de grandes tailles ou ajouter des fonctionnalités par rechargement, nécessite le développement de stratégies de dépôt adaptées aux pièces fabriquées pour garantir l'efficacité du procédé tout en minimisant les déformations et les contraintes résiduelles générées par les forts gradients thermiques. Le travail de recherche proposé consiste donc à simuler le procédé de fabrication par dépôt de fil robotisé et à déterminer les conséquences sur la pièce produite en termes de microstructure, de contraintes et de déformations.

Un premier modèle thermo-mécanique macroscopique du procédé a été mis en place sur Code_Aster et des premières simulations ont été effectuées pour différentes géométries (mur, bloc et tube) et stratégies de dépôt. Des premiers essais expérimentaux instrumentés (thermocouples, caméra thermique, ...) sont réalisés dans le but de calibrer les modèles mis en place mais également de les valider.

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre de la plateforme francilienne de fabrication additive « Additive Factory Hub » impliquant des industriels et des académiques.

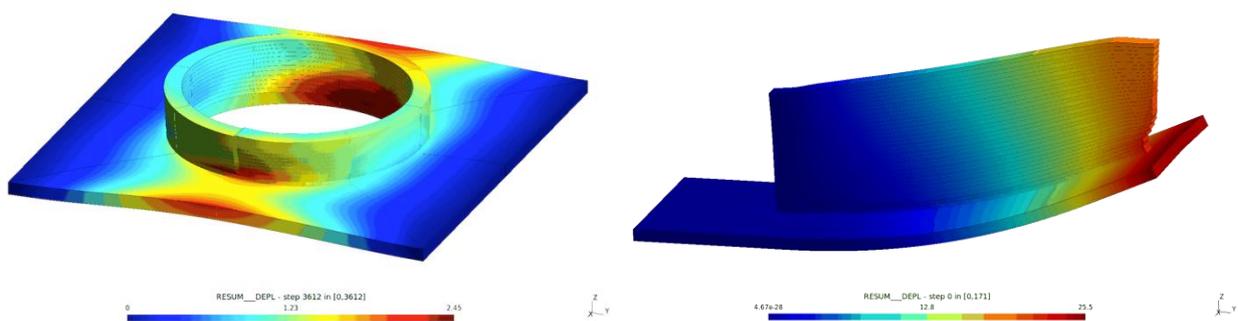


Figure.: Champ de déformation – simulation thermo-mécanique d'un tube (à gauche) et d'un mur sur support encastré (à droite)



Vous pouvez nous contacter :

- Par courrier postal :
Centre des Matériaux Pierre-Marie Fourt
Mines ParisTech
CNRS UMR 7633, BP 87 91003 Evry, France
- Par téléphone : +33 (0)1 60 76 30 00
- Par fax : +33 (0)1 60 76 31 50
- Par courrier électronique : semteam@mat.mines-paristech.fr
- Site web : <http://www.mat.mines-paristech.fr>

Equipe séminaire :

Hugo LAUNAY
Cléa PLOUZE
Mélanie THEVENEAU