

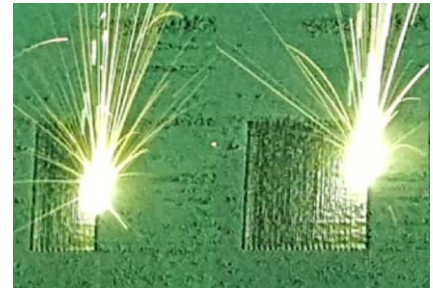


- **Responsables scientifiques** : J.D. Bartout, M.H. Berger, C. Colin, V. Guipont, V. Maurel, M. Mazière, D. Missoum-Benziane
- **Conseiller scientifique** : Y. Bienvenu
- **Responsables techniques** : M. Betbeder, F. Borit, G. Brabant, S. Gailliègue, K. Vieillevigne

Fabrication Additive

Enjeux

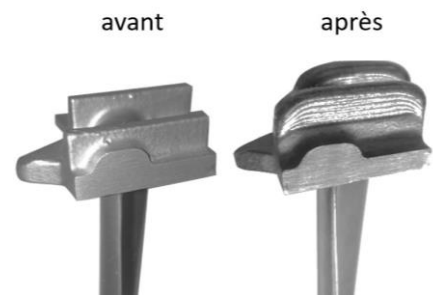
Cet axe transversal FAMHES sur la fabrication additive de pièces de forme traitée aussi bien de la fusion laser sélective de lits de poudre que de la projection laser. De par ces procédés, la combinaison de nouvelles possibilités en termes de géométries et de matériaux ouvre la porte à la conception de composants innovants permettant d'augmenter les températures de fonctionnement, d'alléger les structures (matériaux architecturés) et d'accroître les sollicitations mécaniques par rapport aux procédés traditionnels de coulée. La projection laser permet en plus l'ajout de fonctions sur des pièces existantes ou encore la réparation et le revêtement anti-usure (hardfacing) de pièces usagées. Le développement des procédés additifs relève d'une approche pluridisciplinaire autour de compétences humaines et de moyens techniques des trois pôles du Centre des Matériaux dans les domaines de l'élaboration, de la métallurgie, de la mécanique et de la simulation numérique des matériaux et des procédés.



Fusion laser sur lit de poudre (acier)

Procédés et Matériaux

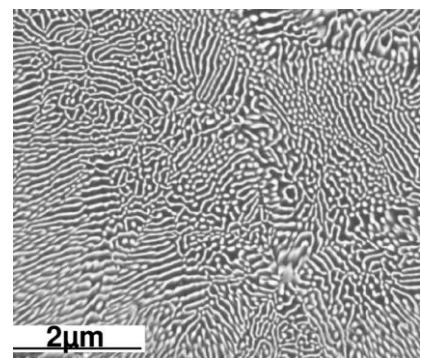
Au-delà de la détermination et de l'optimisation de paramètres de fabrication de pièces saines, l'objectif scientifique consiste à mieux comprendre les mécanismes physiques conduisant **i)** à la fusion d'un milieu granulaire par l'interaction d'un rayonnement laser et à la stabilité du bain liquide, **ii)** à la solidification et au développement de microstructures dans des conditions sévères de gradients thermiques et vitesses de solidification, et **iii)** à la genèse de défauts et de contraintes résiduelles dans les pièces fabriquées. Cette compréhension concourt à l'amélioration de la fiabilité des composants avec le développement d'un contrôle procédé, le recyclage des poudres et la maîtrise du post-traitement. Cette démarche ouvre la voie vers la mise en forme de matériaux innovants et sensibles à la fissuration. Cela passe notamment par un « design » de poudres qu'il faut adapter à la fabrication additive en fonction du cahier des charges de l'application visée.



Réparation TiAl par projection laser (aubage)

Propriétés Structurales et Fonctionnelles

La fabrication additive de pièces pose la question de leur durée de vie dans les conditions réalistes de fonctionnement. La prédiction de la tenue en service passe par la connaissance des mécanismes de déformation, d'endommagement et de rupture en fonction de la typologie et de la taille des défauts encore existants après fabrication.



Fusion laser sur lit de poudre de céramique (eutectique alumine-zircone)



Contrôle du Procédé en Ligne

Le contrôle procédé lors de la fusion laser sur lit de poudre repose sur la mesure des champs thermiques locaux en temps réel du bain liquide associée à ses dimensions, à sa surface et à sa morphologie. La cartographie instantanée des températures permet de calculer les gradients thermiques locaux (mesurés en 4 points du bain liquide) pour :

- Estimer la stabilité locale de la fabrication,
- Détecter, identifier, localiser les défauts et leurs causes,
- Contrôler la microstructure.

L'objectif final est de proposer une tomographie des défauts de la pièce en cours de fabrication et reconnaissables à leur signature thermique.

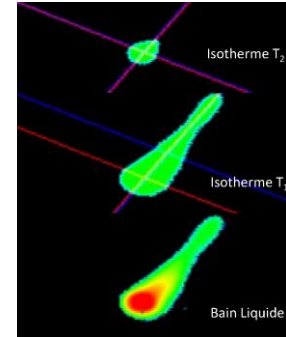
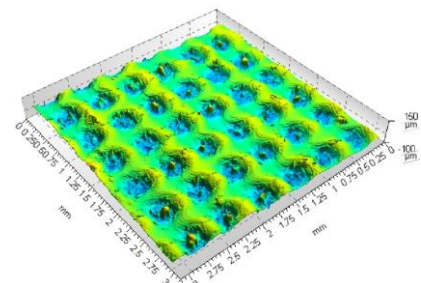


Image thermique du bain et deux isothermes ($T_1 < T_2$)

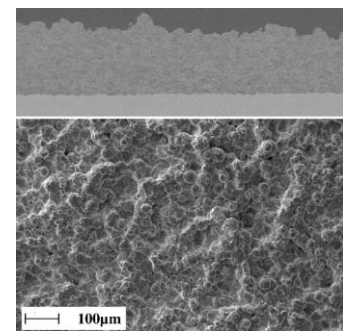
Fonctionnalisation / Réparation / Revêtement

L'essor important de la fabrication additive renforce celui des procédés de projection de poudres pour le revêtement ou la réparation de surfaces mais également pour le formage de préformes mono- ou multi-matériaux. La projection de poudres permet de réparer ou d'ajouter de nouvelles fonctions à la pièce issue de fabrication additive dont l'état de surface doit être maîtrisé par parachèvement voire structuré. Cela concerne prioritairement les procédés avec fusion comme la projection plasma, la projection laser (cladding) ou à l'état solide comme la projection dynamique par gaz froid dite « cold spray ». Tous ces procédés sont fondés sur la maîtrise des états de la matière à l'échelle de la particule de poudre tout au long du procédé incrémental et en relation avec les transformations hors équilibre subies par la matière. Le rapprochement de ces différents procédés « poudres » au sein de l'axe FAMHES permet de les mettre en œuvre et de combiner leurs avantages, de la fabrication à la fonctionnalisation des pièces.

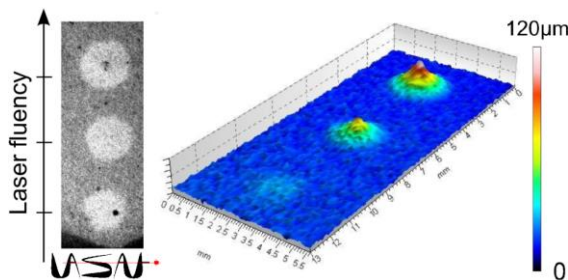
Lorsque la durée de vie des pièces est conditionnée par celle d'un revêtement dans un environnement sévère (corrosion, usure, chocs thermique et mécanique,...) alors la tenue mécanique des interfaces et la résistance du revêtement à l'endommagement sont cruciales. L'essai mécanique LASAT par propagation d'ondes de choc est développé pour la mesure non destructive de l'adhérence des revêtements. L'analyse à différentes échelles (nano-micro-macro) et la modélisation du comportement thermomécanique et de l'endommagement des systèmes revêtus conduisent à la prédiction de la durée de vie.



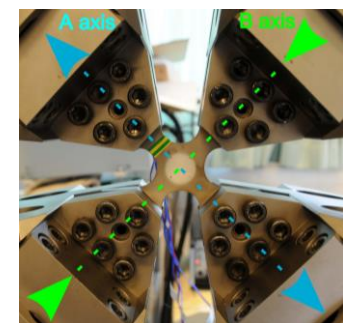
Surface structurée par fabrication additive sur lit de poudre



Superaliage par cold spray (vues en coupe et en surface)



Adhérence et mise au point de défauts calibrés par LASAT sur dépôt Plasma céramique



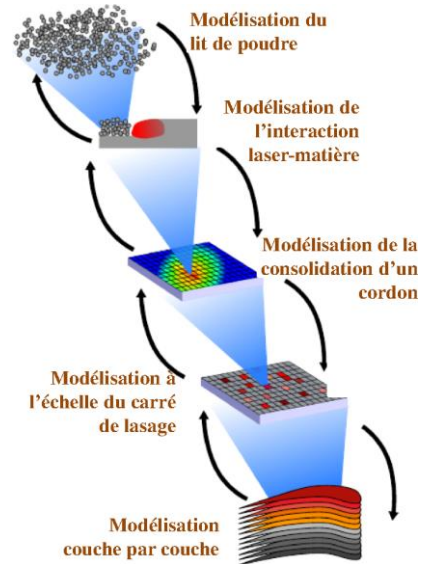
Essai mécanique bi-axial sur éprouvette revêtue d'alumine par projection plasma



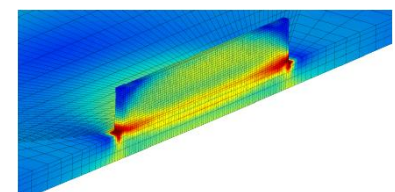
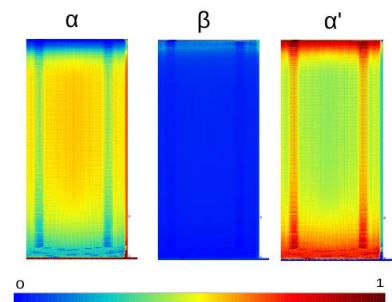
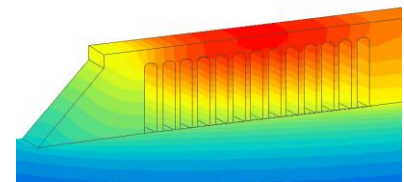
Modélisation et Simulation

La conception et le dimensionnement de pièces complexes reposent aujourd’hui sur la simulation numérique qui permet de reproduire les sollicitations issues de leurs élaborations et de leurs conditions de fonctionnement. Dans le cas d’une pièce obtenue par fabrication additive, il est important de simuler aussi fidèlement que possible le procédé et ses phénomènes associés dès l’étape de fabrication. La simulation permet la prise en compte des effets thermiques, métallurgiques et mécaniques en cours de fabrication pour constituer un outil robuste pour **i)** l’estimation des contraintes résiduelles et des déformations associées et **ii)** la prédiction de la microstructure issue de la fabrication et son évolution lors de post-traitements de détensionnement, de recristallisation ou de précipitation.

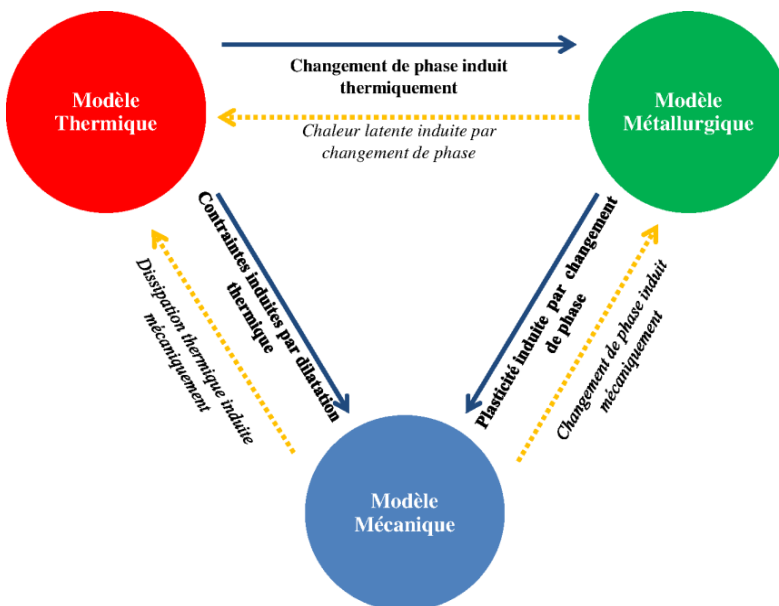
La simulation de ces procédés est alors dominée par les aspects multi-physiques et multi-échelles (du bain liquide à la pièce). En raison de la durée excessive des simulations actuelles (plus longues encore que la fabrication), aucun logiciel ne s’est encore imposé pour la fabrication additive. L’axe FAMHES du Centre des Matériaux et le Centre de mise en forme des matériaux (basé près de Nice) conjuguent leurs efforts et investissent en propre des travaux combinant simulation et expériences de validation pour le développement d’un code métier applicable au domaine de la fabrication additive aussi bien sur lit de poudre que par projection laser. L’objectif d’un tel logiciel est de simuler la fabrication de pièces de forme et de taille industrielle dans des temps de calcul raisonnables, tout en prenant en compte les conditions aux limites au plus proche de la réalité ; sa finalité étant une aide à la production de pièces prêtes à l’emploi.



Les différentes échelles de la modélisation en fabrication additive



Simulation de l'évolution de la température de l'éprouvette « peigne » réalisée par SLM (haut), des fractions massiques de phases d'un mur en TA6V obtenu par projection laser (milieu) et de ses contraintes résiduelles (bas)



Couplage multi-physique pour la modélisation des procédés de fabrication additive





SAVOIR FAIRE

Equipements d'élaboration et de Post-traitement

- Machine **PHENIX PM 100T** dotée de vision coaxiale du bain et de mesure des champs de température en temps réel.
- Machine **CONCEPT LASER M2 dual laser** équipée d'un chauffage coaxial secondaire et d'un contrôle procédé en ligne
- Projection Cold Spray (600°C/3MPa/N₂-He)
- Projection Plasma (torches F4 et F100 connex)
- Enceinte de projection 18m³ robotisée sous air ou sous vide
- Choc laser (5ns/2J) : adhérence LASAT et laser peening
- Fours de traitements thermiques sous atmosphère contrôlée et sous vide
- Four d'élaboration de nouveaux alliages de type Arc Melting

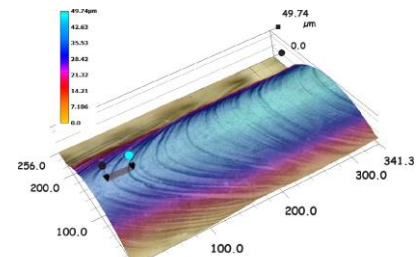


Image optique à grande profondeur de champ sur cordon SLM

Diagnostics Procédés

- Caméras IR, imagerie haute fréquence
- Pyrométrie mono- et bichromatique
- Cold Spray Meter (Tecnar): vitesse et température de particules

Caractérisation Poudres

- Distribution granulométrique par laser
- Mesure de densités
- Coulabilité
- Analyse morphologique (MEB et analyse d'image)



Image MEB de particules de poudre d'un alliage base cobalt

Caractérisation Matériaux

- Transformations métallurgiques par Analyse Thermique (DTA et DSC)
- Structure cristallographique par EDS et EBSD
- Analyse chimique par EDS et WDS
- Observation au TEM (analyse chimique)
- Mesure et profilométrie optique 3D
- Propriétés optiques des matériaux par réflectométrie

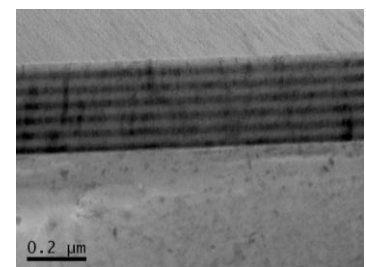


Image MET d'un dépôt PVD céramique multicouche nanométrique sur métal

Modélisation – Simulation Numérique

- Développement d'outils logiciels dédiés
- Modélisation thermique, métallurgique et mécanique
- Modélisation à l'échelle du cordon, de la couche et de la pièce