



Fabrication Additive multimatériaux et multiprocédés

18 avril 2023

Approche multi-matériaux pour la fonctionnalisation et la réparation d'outils de matriçage par procédé LASER-poudre (LMD-p)

GILLES Thomas, Ingénieur de Recherche IRT Saint-Exupéry

thomas.gilles@irt-saintexupery.com



Contexte & Enjeux



- Cadre du projet **MAMA** « Metallic Advanced Materials for Aeronautics »
 - ✓ Réduction de 30% du poids de matière engagée (PMO) pour le matriçage des éléments de structure primaire forgés en Ti64
 - ✓ Développement de nouvelles routes thermomécaniques pour le forgeage des composants
 - ✓ Etude de l'hybridation des procédés de matriçage et de fabrication additive

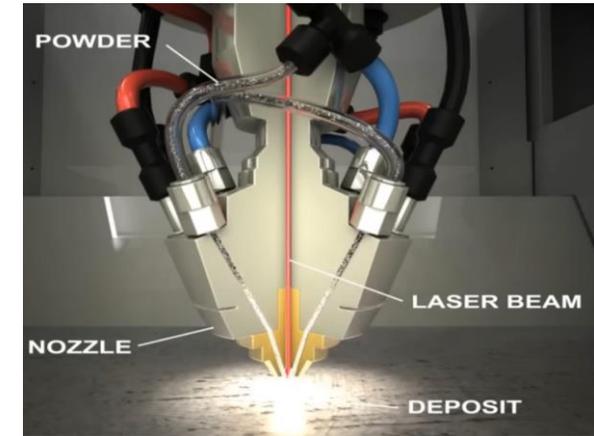


- Lot dédié à la **réparation des outils de matriçage** (↘ coûts NRC) par fabrication additive:
 - ✓ Outils aciers (matriçage conventionnel ~450°C) et à base nickel (« hot die » ~650°C)
 - ✓ Pratique empirique: rechargement MIG manuel (impact sur le substrat !) → TTH → reprise usinée
 - ✓ Innovation : **Fabrication Additive (LMD-p) + nouvelles nuances de métal d'apport**
 - ✓ Objectifs: limiter l'impact sur le substrat sans TTH dédié ni réusinage + DURABILITE de la réparation

La Fabrication Additive LMD-p : c'est quoi ?



- **Laser Metal Deposition of Powder (LMD-p)** : fusion de poudre par focalisation d'un faisceau LASER (haute densité d'énergie)
- Famille des procédés DED (i.e. Direct Energy Deposition):
 - ✓ Création d'une pièce 100% LMD-p ex-nihilo
 - ✓ **Réparation et/ou ajout de fonction(s)** sur pièce existante en **limitant l'impact sur le substrat**



- Machines de la plateforme fabrication additive @IRT + moyen industriel similaire @OPT'ALM (PME partenaire du projet MAMA)
 - ✓ Source LASER (Yb:YAG $\lambda=1070\text{nm}$) de 2kW
 - ✓ Cinématique 5 axes (X, Y, Z + B + C)
 - ✓ Atmosphère inertée à l'argon (<1ppm O₂ ; <20ppm H₂O)
 - ✓ Plusieurs système de distribution & mélange de poudre

Feuille de route pour la Réparations LMD-p d'Outils

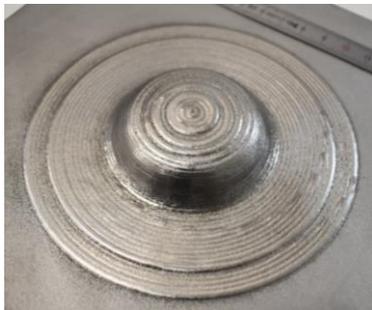
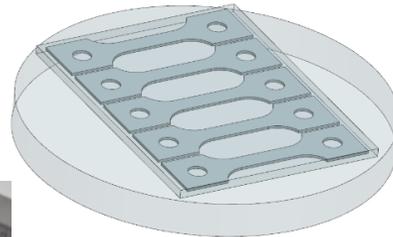
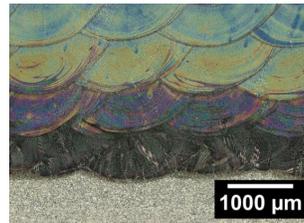
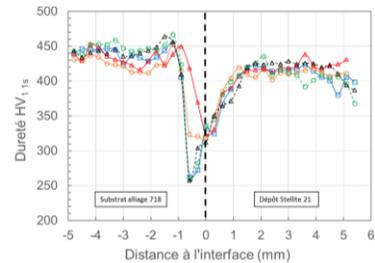


Dépôts	Substrats		
	X38	AD820	Ni718
Stellite21®	✓	✓	✓
ABD900 ⁽¹⁾	n/a	n/a	✓
AD730®	n/a	n/a	✓

→ 5 couples « substrat/dépôt » testés

- 3 substrats : 2 nuances d'acier (CrMo et NiCrMo) + 718
- 3 nuances d'apport: Stellite21® (CoCr) + 2 alliages base Nickel (γ')

(1) Stellar® ABD®-900AM



Etape 1

- **Mise au point paramétrique LMD-p**
- Evaluation des couples substrat/dépôt (macrographies)
- Evaluation de la dureté « As-built » + $f(T^\circ/\text{tps})$

TRL3

Etape 2

- Fabrication des bruts pour **essais mécaniques**
- Essais de traction (RT/450°C/650°C)
- Essais de cisaillement de l'interface

TRL4

Etape 3

- Transfert IRT → OPT'ALM : stratégie FAO et paramètres
- Réparation d'outils à l'échelle semi-industrielle → **campagne d'essais sous presse R&T (1kt)**
- **Démonstrateur** : réparation d'un outil à l'échelle industrielle

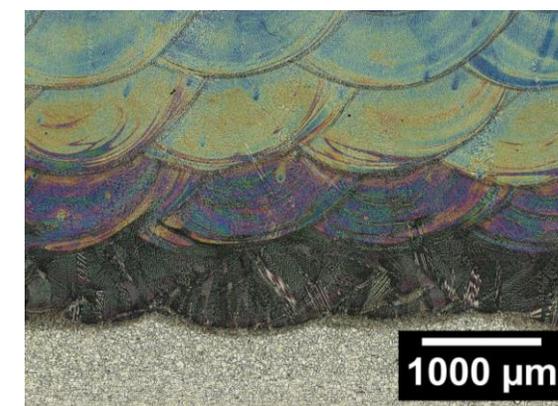
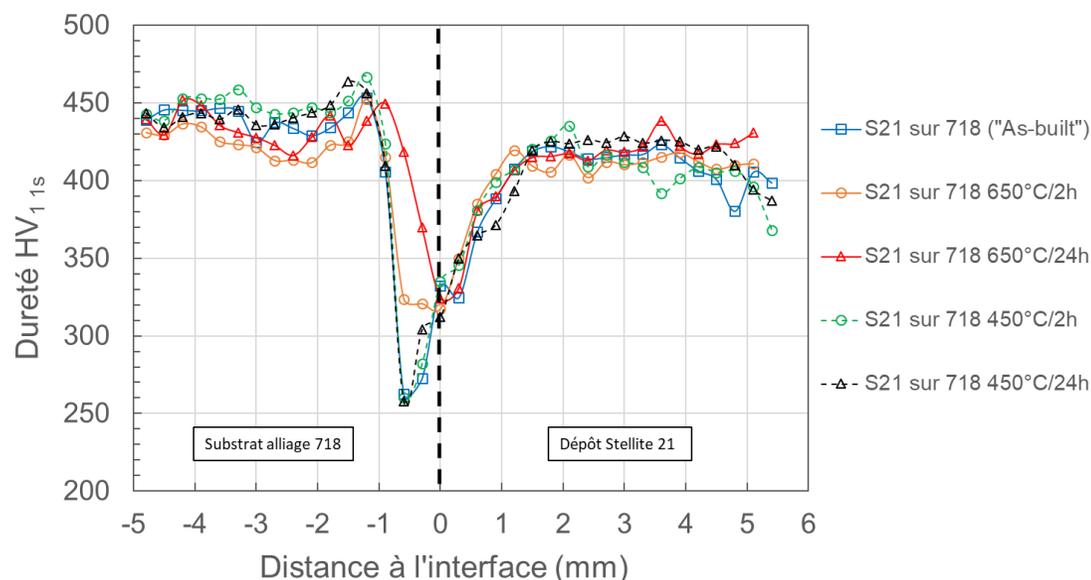
Réparation Laser poudre (LMD-p) d'Outils de matriçage

Etape 1

- Dépôt de Stellite21® sur substrat en alliage 718
- Profil de dureté et macrographies à différents états thermiques (« As-built » ; 650°C/2h ; 650°C/24h ; 450°C/2h ; 450°C/24h)

Exemple n°1 d'évolution de la dureté à l'interface substrat/dépôt:

- Adoucissement du substrat ~1mm sous le dépôt (remise en solution du 718)
- Evolution de HV avec l'augmentation de T° sur les 1^{ère} couches
- Bénéfice du préchauffage d'outil à 650°C/2h : début du durcissement structural de l'alliage 718
- **Gradient de composition** sur les 1^{ère} couches par **l'effet de la dilution**



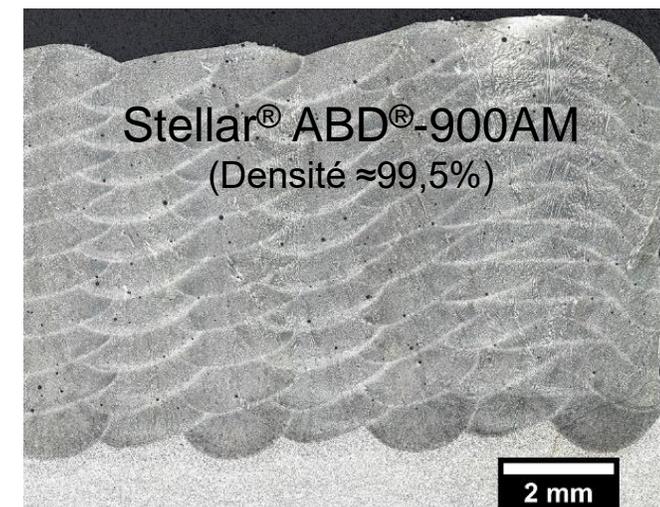
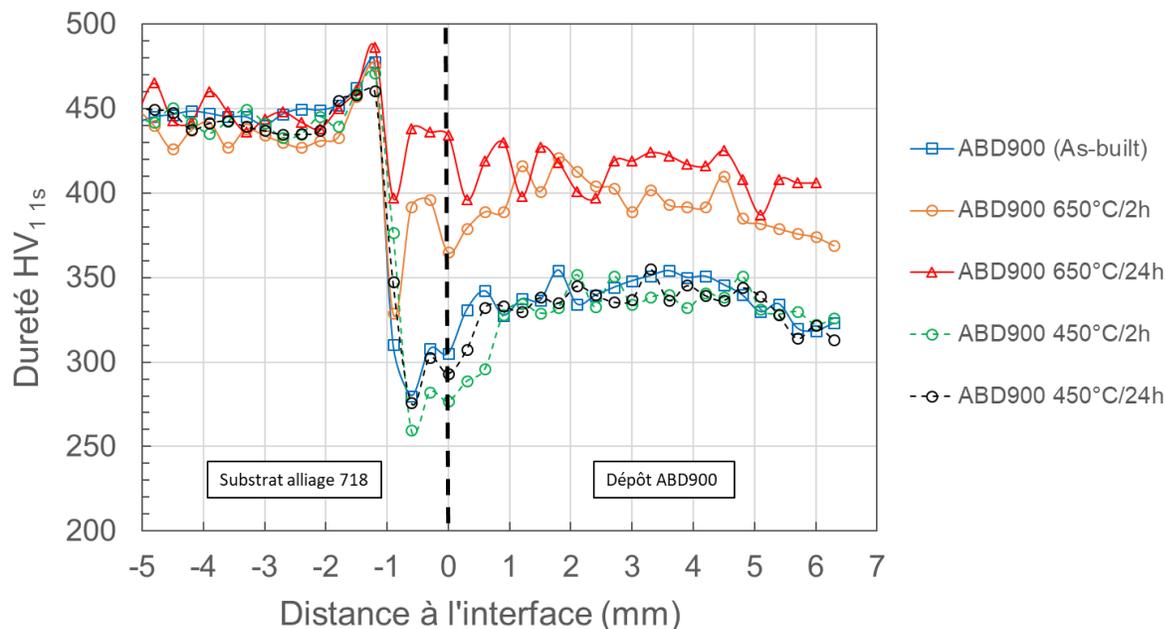
Réparation Laser poudre (LMD-p) d'Outils de matriçage

Etape 1

- Dépôts en Stellar[®] ABD[®]-900AM sur substrat en alliage 718
- Profil de dureté et macrographies à différents états thermiques (« As-built » ; 650°C/2h ; 650°C/24h ; 450°C/2h ; 450°C/24h)

Exemple n°2 d'évolution de la dureté à l'interface substrat/dépôt:

- Evolution de HV avec l'augmentation de T° sur les 1^{ère} couches
- Effet de la température de préchauffage de l'outil sur HV avant matriçage
- **650°C/2h: amélioration HV dépôt + atténuation abatement à l'interface**



Etude des propriétés mécaniques des dépôts LMD-p

Etape 2

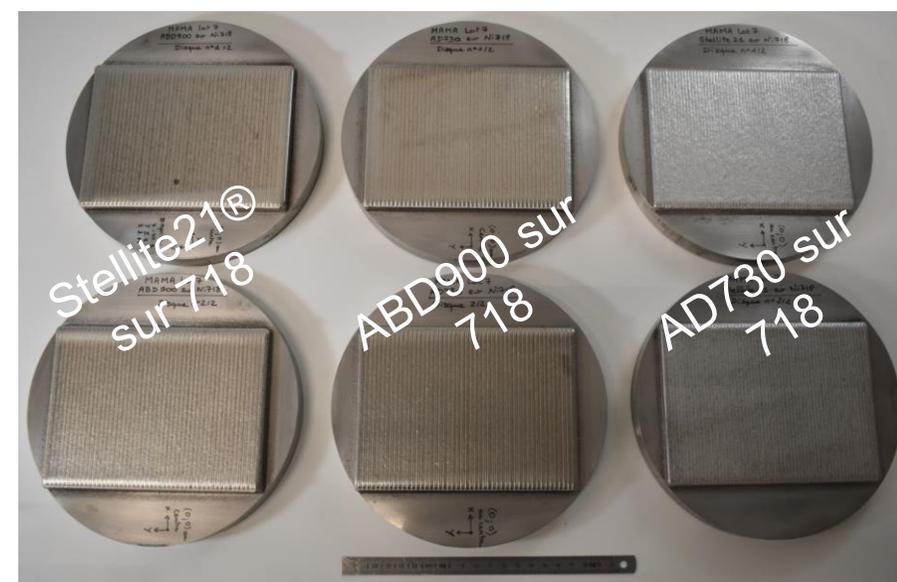
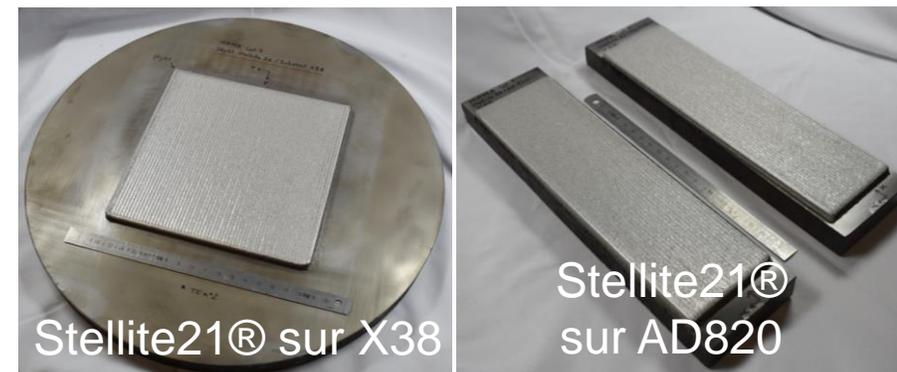
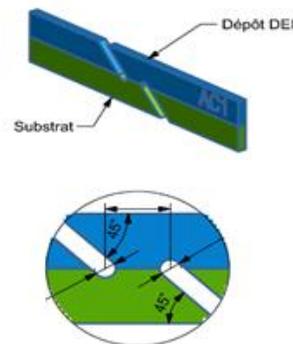
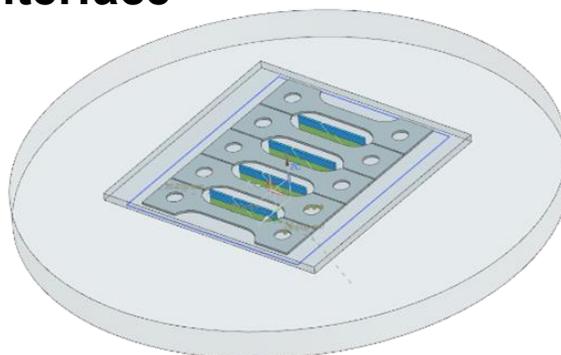
- Fabrication des bruts pour essais mécaniques
- Traitement Thermique (simulation du préchauffage des outils)

Réalisation de dépôts pour usinage d'éprouvettes mécaniques

- Production de bruts capables @IRT Saint Exupéry
- TTH: outils acier (450°C/2h) ; outils « hot die » (650°C/2h)

Intérêt concurrentiel : le préchauffage standard des outils avant mise sous presse permet de combiner le détensionnement et l'optimisation des propriétés mécaniques (dureté)

- Usinage des éprouvettes de **traction planes** dans le dépôt et de **cisaillement à l'interface**



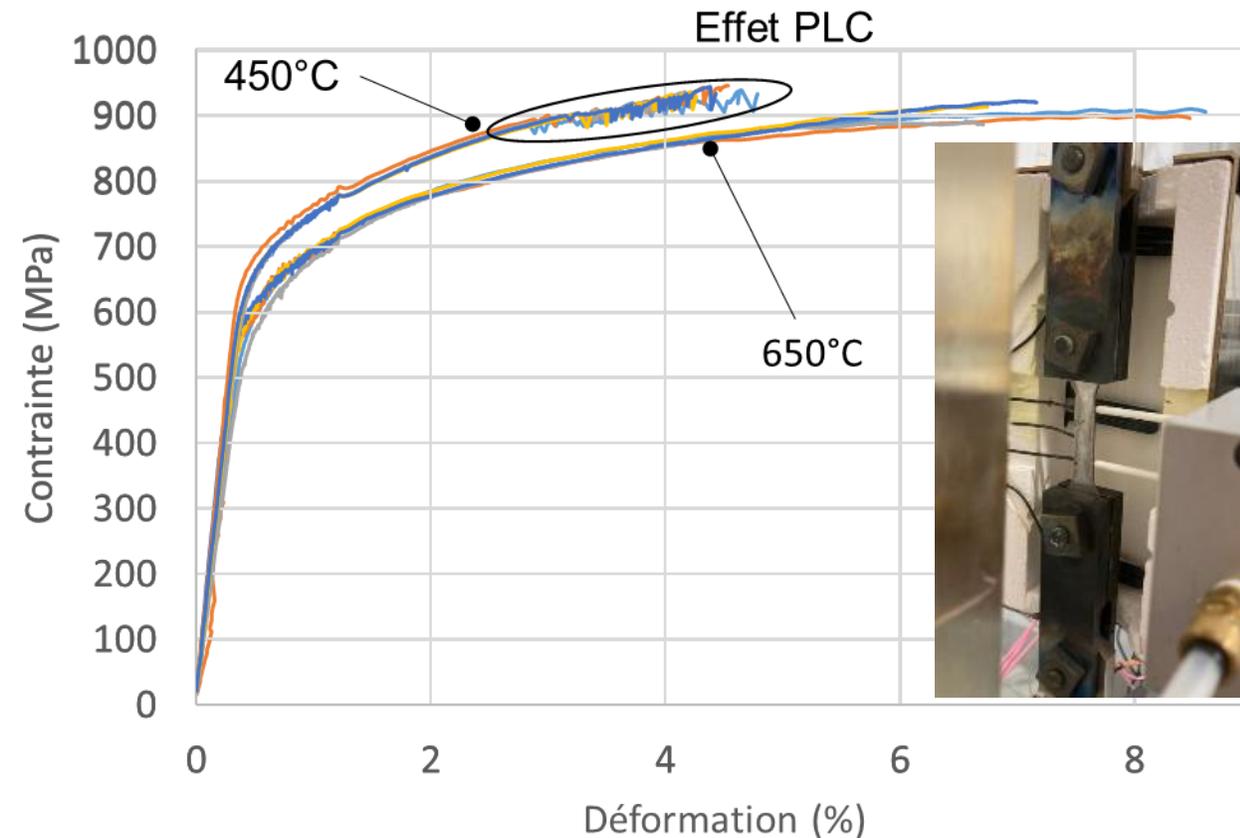
Etude des propriétés mécaniques des dépôts LMD-p

Etape 2

- Essais mécaniques de traction (RT/450°C/650°C) → alimenter la modélisation des outillages

Exemple n°1 : comportement de la Stellite21® (TTH 650°C / 2h) @450°C et 650°C

- Cas d'un outil type « hot die » pouvant être utilisé en conventionnel
- Consolidation appréciable de la Stellite21® dans le domaine plastique
- Abaissement de R_e & R_m et gain en allongement avec l'augmentation de la température



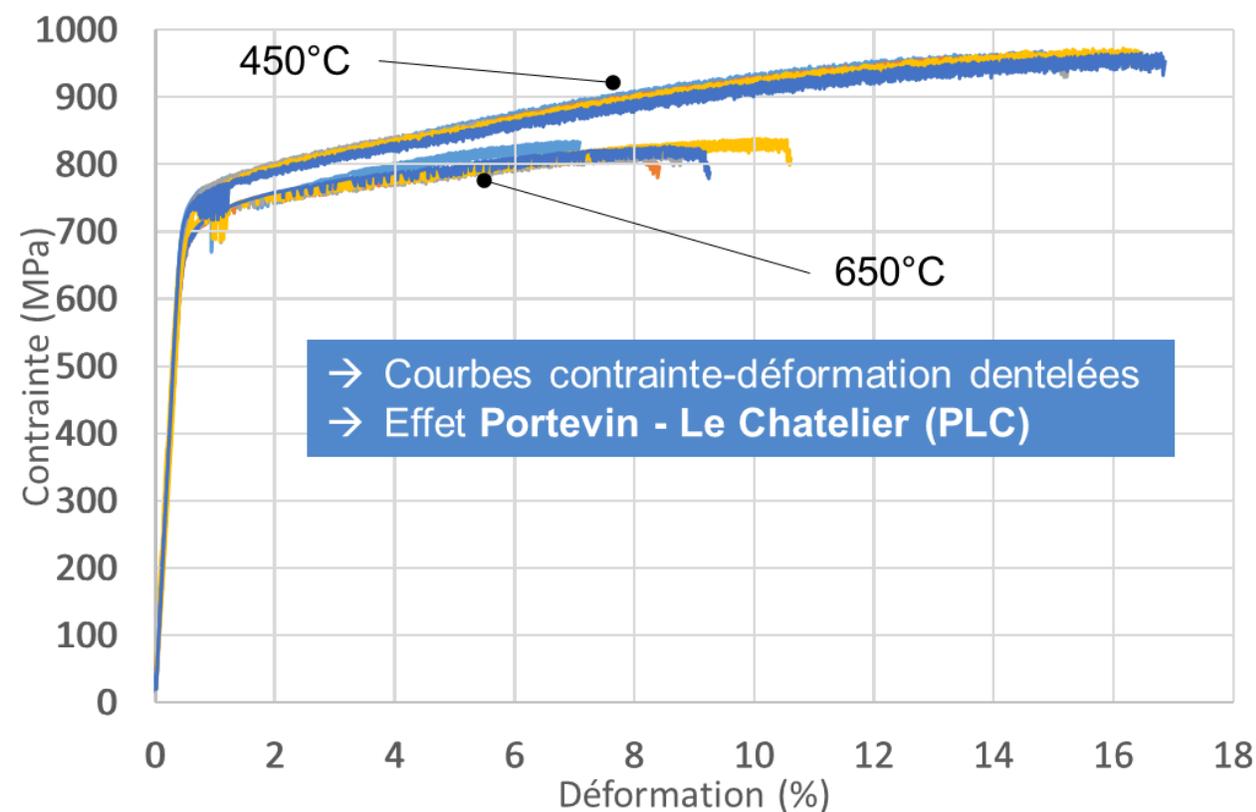
Etude des propriétés mécaniques des dépôts LMD-p

Etape 2

- Essais mécaniques de traction (RT/450°C/650°C) → alimenter la modélisation des outillages

Exemple n°2 : comportement de Stellar® ABD®-900AM (TTH 650°C / 2h) @450°C et 650°C

- Consolidation plus limitée que pour la Stellite21® dans le domaine plastique
- R_e & R_m légèrement supérieurs à celui de la Stellite21® (sauf R_m @650°C)
- Abaissement de R_e & R_m ET perte en allongement avec l'augmentation de la température





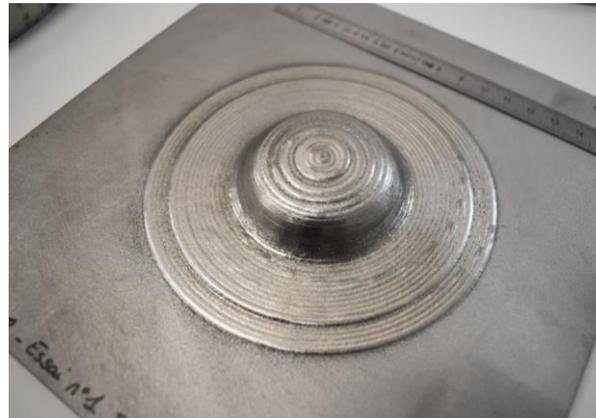
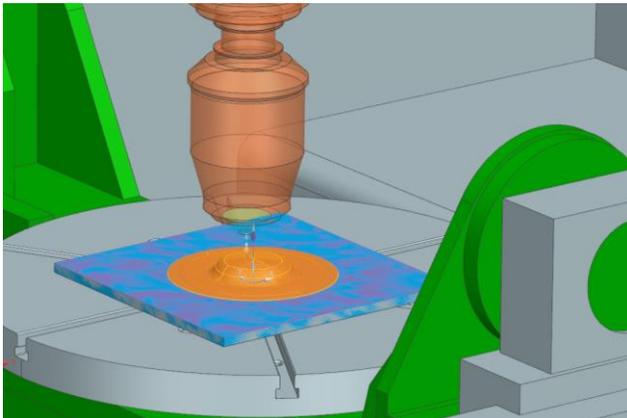
Réparations LMD-p d'outils

Etape 3

- Réparation d'un outil : exemple de reconstruction d'un pion de centrage
- Transfert IRT → OPT'ALM : stratégie FAO et paramètres

Cas d'application

- Proposer une gamme de réparation pour reconstruire après ablation de la partie endommagée, le **pion de centrage** (h11mm Ø60mm) d'un poinçon axisymétrique en alliage 718
- S'affranchir de tout TTH spécifique et d'une reprise usinée
- Développement de la stratégie de construction sous FAO et 1^{er} essais de faisabilité @IRT



Ø400mm ; h220mm Poids 230kg env.



Réparations LMD-p d'outils



Etape 3

- IRT → OPT'ALM : **portabilité des paramètres inter-machines**
- Réparation d'outils pour essais de matriçage à l'ARDEM (A&D)

OPT'ALM
Additive Manufacturing Options

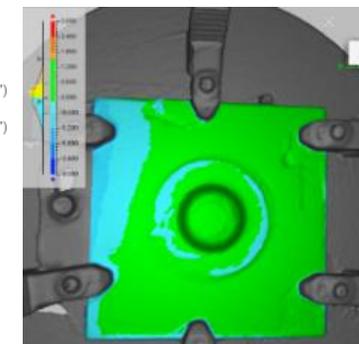
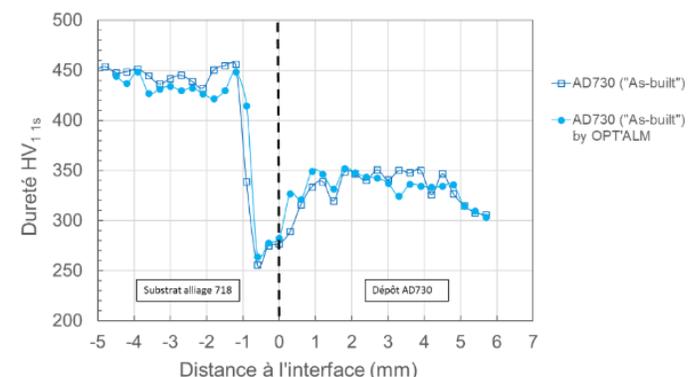
Transfert de la paramétrie IRT → OPT'ALM

- Validation du transfert de **paramètres** (comparatif des macrographies et filiations de dureté)
- Mise au point de la **stratégie de remplissage** pour le dépôt du pion de centrage (macrographies)
- Validation de la géométrie déposée par **scan-3D** dans **l'enceinte machine**

Réparation d'outils pour essais presse 1kt

- Simulations de réparation d'outils de presse (5 couples substrat/dépôt)
- **Evaluer le comportement des dépôts sous presse R&D de 1000t @ atelier ARDEM (Aubert&Duval)**

Revêtement d'AD730 sur alliage 718 (état durci) par LMD-p





Réparations LMD-p d'outils



Etape 3

- IRT → OPT'ALM : portabilité des paramètres inter-machines
- Réparation d'outils pour **essais de matriçage à l'ARDEM (A&D)**



Exemple: Séries de matriçages sous presse R&D 1000t

- Presse d'essai (moyen mutualisé IRT – Aubert&Duval) localisé à l'atelier ARDEM d'Aubert&Duval (Pamiers 09)
- Presse pilotée initialement en **effort max.** sur la base suivante:
 - σ_n max. atteintes sur les pièces en production indus.
 - Simulation thermomécanique sous *Forge* dans l'environnement ARDEM
- Enchaînement du matriçage de 10 lopins en alliage 718 préalablement chauffés pour évaluer le comportement de la réparation LMD-p (TRL4)





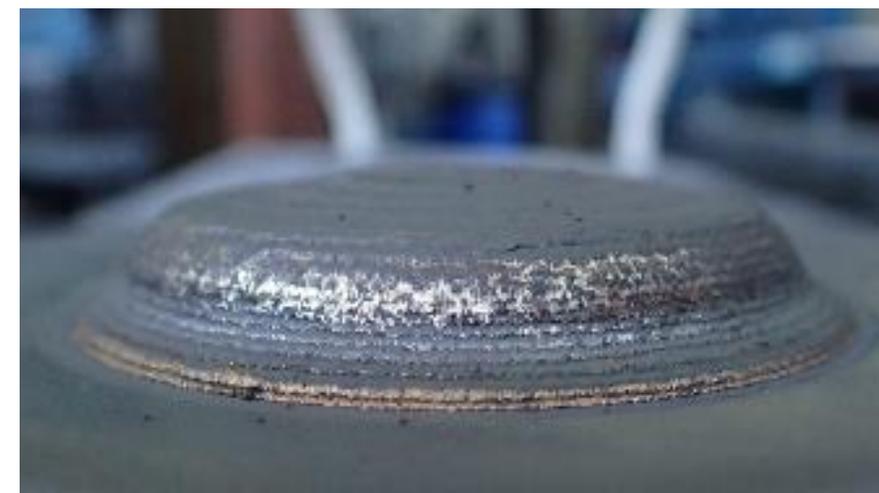
Réparations LMD-p d'outils

Etape 3

- IRT → OPT'ALM : portabilité des paramètres inter-machines
- Réparation d'outils pour **essais de matriçage à l'ARDEM (A&D)**

Observations globales

- ✓ Aucun dommage notable des dépôts LMD-p (arrachement partiel, décohésion avec le substrat, fissuration...)
- ✓ Léger matage (normal) des couches LMD dans les fortes pentes
- ✓ Pas de recul du pion dans le substrat (en visuel)
- Scan3D du pion de centrage déposé en LMD-p avant ET après matriçage pour confirmation + coupe macrographique de l'outil pour analyses (*in-progress*)





Réparations LMD-p d'outils



Etape 3

- IRT → OPT'ALM : portabilité des paramètres inter-machines
- Réparation d'outils pour **essais de matricage à l'ARDEM (A&D)**



Etat de surface des lopins matricés

- Empreintes de trajectoires de dépôt LMD à la surface des lopins matricés + texture « *poudrée* »

→ **Etat de surface acceptable** pour l'exploitation future de l'ébauche matricée (*workflow industriel*) ✓



Conclusions



Approche Multi-matériaux pour la Fonctionnalisation et la Réparation d'Outils de Matriçage par Procédé LASER Poudre (LMD-p)

- Efficacité / Rapidité / Complémentarité de la démarche en Occitanie :
« R&D from scratch » (IRT Saint Exupéry) → PME (OPT'ALM) → Industriel (Aubert&Duval)
- Les essais prometteurs sous presse 1000t (TRL4) permettent de valider un emploi à l'état BRUT de réparations LMD-p et SANS TTH spécifique
- Aubert & Duval met à disposition du projet MAMA un outil industriel (presse 40kt) en alliage 718 pour simuler la réparation LMD-p d'un démonstrateur industriel (TRL5) au *Printemps 2023*
- L'évaluation du démonstrateur dans un contexte industriel → validation de l'intérêt combiné de **nouvelles nuances d'apport γ'** (ex. Stellar® ABD®-900AM) mises en œuvre par LMD-p