

LA FABRICATION ADDITIVE AU CNRS

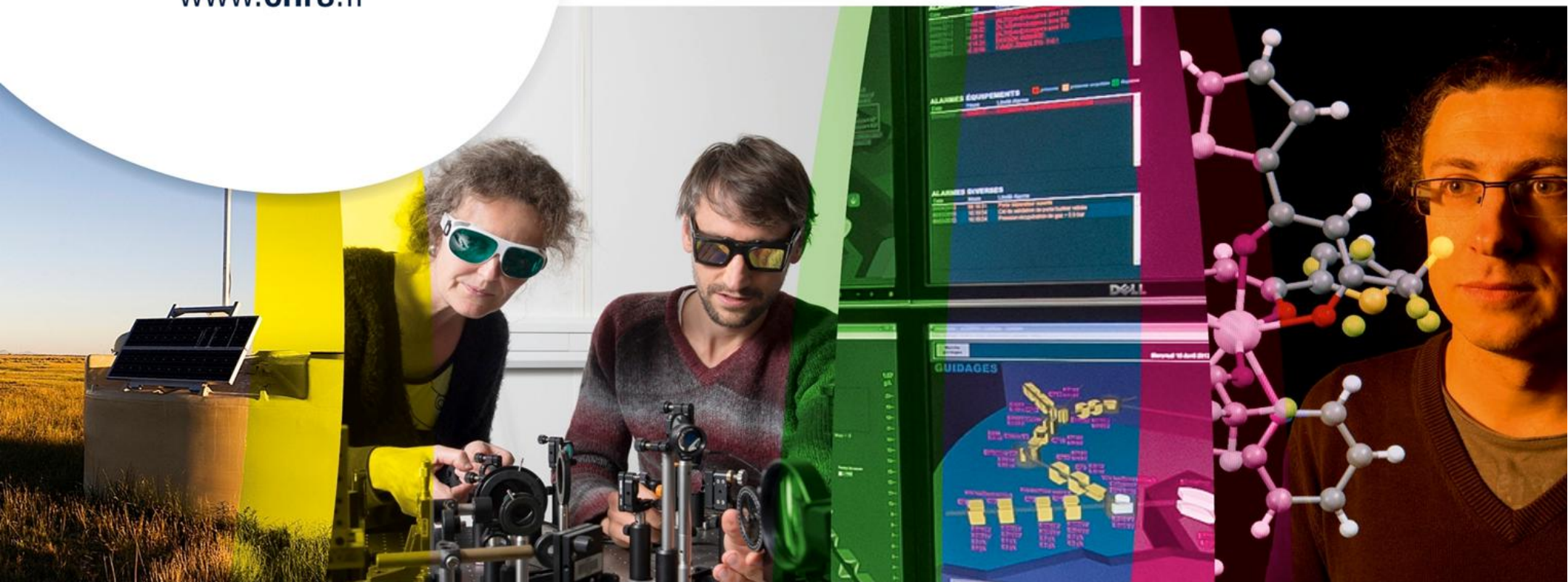
ORSAY, LE 13 DECEMBRE 2018

Cyril GORNY

**Ingénieur en Techniques Expérimentales
Laboratoire PIMM – UMR8006**



www.cnrs.fr



A horizontal banner at the top of the slide features a collage of images: people in a boat on the left, a close-up of a person's face in the center, and a hand holding a yellow object on the right.

PLAN DE LA PRESENTATION

- Présentation du CNRS
- Les labos du CNRS face à la chaîne de valeur de la FA
- Matériaux étudiés et secteurs d'application
- Structuration, équipements,...
- Les projets de FA

ET

- Quelques exemples concrets

LES INSTITUTS DU CNRS



P.3

Les instituts doivent répondre à **3 grands enjeux** :

- | Faire avancer le front de la connaissance
- | Relever les grands défis planétaires
- | Faire émerger les nouvelles technologies de pointe

Disciplines scientifiques couvertes :

- | mathématiques
- | physique
- | sciences de l'information
- | physique nucléaire et des particules
- | sciences de l'Univers
- | chimie
- | biologie
- | sciences humaines et sociales
- | écologie et environnement
- | ingénierie et systèmes

Principaux instituts acteurs de la FA métallique
INSIS, INC, INS2I, INP



POURQUOI CHOISIR LE CNRS POUR LA FA ?



P.4

I Il est un acteur majeur du programme **Investissements d'avenir** (Labex, Equipex, IRT,...)

I Bonne répartition des laboratoires sur le territoire national

I **L'INTERDISCIPLINARITE 95% des recherches** sont effectuées par des **Unités Mixtes de Recherche**. Présence :

⇒ Sur toute l'échelle des TRL

⇒ Dans toutes les briques de la Chaîne de Valeur de la FA (CVFA)

1 Créativité / Innovation	2 Design	3 Matériaux	4 Fabrication 3D Procédés	5 Post-traitement	6 Contrôles / Caractérisation	7 HSE	8 Chaîne numérique	9 Normalisation
---------------------------------	-------------	----------------	---------------------------------	----------------------	-------------------------------------	----------	--------------------------	--------------------

LA CHAÎNE DE VALEUR DE LA FA (CVFA) : PRINCIPALES COMPÉTENCES DES LABOS



P.5

1- Créativité/Innovation

- | Analyse de l'usage
- | Rétro-conception

2- Design

- | Optimisation topologique
- | Optimisation paramétrique
- | Règles de conception
- | Calculs et simulation
- | Cycle de vie et recyclabilité

3- Matériaux

- | Caractérisation des poudres
- | Fonctionnalisation des poudres
- | Nouveaux alliages
- | Gradient de propriétés
- | Optimisation métallurgiques
- | Propriétés des milieux granulaires
- | Matériaux architecturés

4- Fabrication 3D / Procédés

- | Interaction énergie/matière
- | Instrumentation
- | Pilotage du procédé
- | Simulation et modélisation du procédé
- | Adaptation multi matériaux

5- Post-traitement

- | Usinage
- | Maîtrise du dimensionnel
- | Traitements
(chimiques, mécaniques, thermiques)
- | Revêtements de surface
- | Fonctionnalisation des surfaces

6- Contrôles et caractérisation

- | Contrôle des poudres
- | Caractérisation surfacique
- | Caractérisation volumique
- | Caractérisation mécanique
- | Caractérisation matériau
- | Contrôle dimensionnel
- | Durabilité en service

7- HSE

- | Recyclage des poudres
- | Connaissance de la réglementation
- | Sécurité des opérateurs

8- Chaîne numérique

- | PLM (Cycle de vie)
- | Format des données
- | Exploitation des données (Big Data)
- | Simulation globale du processus
- | Continuité numérique

9- Normalisation

- | Méthodes de spécification
- | Méthodes de test

PRINCIPAUX MATERIAUX ET SECTEURS D'ACTIVITE



P.6

I Principaux matériaux étudiés

- | Alliages de Titane
- | Alliages d'aluminium
- | Alliages base nickel
- | Alliages base fer
- | Alliages base chrome
- | Composites à matrice métalliques
- | Autres matériaux (haute entropie, Cu, Au, Mo,...)

I Secteurs d'activité par ordre d'importance

- | Aéronautique
- | Spatial
- | Médical
- | Automobile
- | Militaire
- | Energie
- | Fabrication de moules / outillages
- | Transports lourds
- | Luxe

STRUCTURATION DES COMPETENCES



P.7



| **LABEX DAMAS** : LABoratory of EXcellence Design of Alloy Metals for low-mAss Structures (LEM3-UMR7239 / IJL-UMR7198)

| **LABEX CEMAM** : Centre of Excellence of Multifunctional Artitected Materials (SIMAP-UMR5266 / LEPMI-UMR5279 / LMGP-UMR5628)

| **GDR 3328 Solidification des alliages métalliques**

Thème 2 : Solidification rapide – Procédés laser et fabrication additive

| **GDR 3532 MODMAT** (Modélisation des matériaux)

PRINCIPAUX LABORATOIRES ACTEURS DE LA FABRICATION ADDITIVE METALLIQUE



P.8



Bretagne et Pays-de-la-Loire



Normandie et Hauts-de-France



CENTRE DES MATERIAUX
P. M. FOURT
UMR7693



UMR8579



UMR7693



UMR7239



UMR7274



UMR7198

Grand-Est, Centre-Val-de-Loire et
Bourgogne Franche-Comté



UMR5295



UMR7315



CEMES
UPR8011



UMR5085



UMR5312

Nouvelle Aquitaine



UMR5521



UMR5259



UMR5510



UMR5307



UMR5266



UMR5272

Auvergne-Rhône-Alpes



UMR7296



UMR7635

Occitanie
et Provence-Alpes-Côte-d'Azur

NOUS NE SOMMES PAS SEULS...



P.9

I Les IRT



I Les centres techniques



I Autres institutions



I Les laboratoires de recherche non CNRS



P.10

I Métallurgie des poudres

- I Tour d'atomisation par gaz (ICB)
- I Sphéroïdisation de poudres par plasma induit (Plateforme ADDIFAB)

I Fusion lit de poudre

- I Machines LBM (Plateforme ADDIFAB, PIMM, CDM, I2M-Plateforme FUTURPROD, LEM3...)
- I Machines EBM (SIMAP)

I Dépôt de matière

- I Machines LMD (Plateforme ADDIFAB, PIMM, LMS,...)
- I Machines de dépôt fil WAAM et CMT (G-SCOP, Ecole Centrale de Nantes,...)

I Frittage

- I Machines de frittage flash
- I Machines de frittage μ ondes
- I Machines de frittage par induction

Et sûrement d'autres...

EXEMPLES DE MOYENS PROCEDES (LBM ET EBM)



P.11



SLM Solutions SLM125



SLM Solutions SLM280



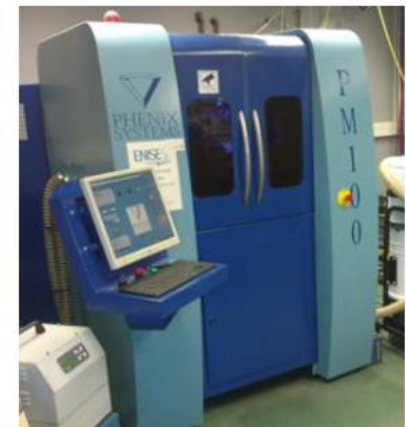
3D System PRO X200



Concept LASER M2



EBM - Arcam A1



Phenix System PM100

EXEMPLES DE MOYENS PROCÉDES (LMD ET DEPOT FIL)



P.12



LMD - TRUMPF LASMA 1054



LMD - TRUMPF DMD505



LMD - BeAM Mobile



LMD - OPTOMECH LENS 650R



CELLULE ROBOTISÉE



CELLULE ROBOTISÉE
CMT (Cold Metal Transfert)

LES MOYENS TECHNIQUES STRUCTURES



P.13



I EQUIPEX MATMECA (ONERA, MSSMAT-UMR8579, LMS-UMR7649, CDM-UMR7693)

- | Elaboration par métallurgie des poudres (+ depuis 2017, machine BeAm du LMS)
- | Caractérisation micro-mécanique in-situ
- | Calcul intégré dans un réseau ultrarapide

I EQUIPEX MANUTECH USD : Ultrafast Surface Design (LGF-UMR5307, LTDS-UMR5513, LAMCOS-UMR5259, Laboratoire Hubert Curien-UMR5516)

- | Parachèvement de surface
- | Fonctionnalisation de surface

I METAFENSCH : CNRS co-fondateur

- | Plateforme de fabrication de poudres métalliques
- | Plateforme de recyclage de titane



DEPUIS PRESQUE 10 ANS, LE CNRS ACTEUR DANS LES PROJETS DE FA (1)

The CNRS logo is a dark blue circle containing the letters 'cnrs' in a white, lowercase, sans-serif font.

P.14

I 8 ANR dont 3 en cours

- | **FA2SCINAE** (2015-2018) : Fabrication Additive et FAtigue de Structures Cellulaires Intégrées en Aeronautique
- | **COFFA** (2018-2020) : Conception et Optimisation de Forme pour la Fabrication Additive
- | **GEOCAM** (2017-2020) : Maîtrise géométrique des pièces produites par fabrication additive métallique

I 10 FUI et PSPC dont 7 en cours

- | **SOFIA** (2016-2020) : SOLutions pour la Fabrication Industrielle Additive métallique
- | **3D HYBRIDE** (2017-): Machine HYBRIDE d'impression 3D métal couplant fonctions additive (SLM) et soustractive (laser ultracourt)
- | **ALMEE** (2017-): Aluminium Additive Layer Manufacturing pour Equipments Electroniques
- | **NENUFAR** (2015-2018): Nouveaux Emplois, Nouvelles Utilisations de la Fabrication Additive en Réparation
- | **ALMINCO** (2016-2018) : Additive Layer Manufacturing for Nickel Based Superalloy INCO718LC
- | **FAIR** (2016-2019) : Fabrication Additive pour Intensification de Réacteurs
- | **COMPO** (2018-): COnception pour la Métallurgie des POudres de conteneurs innovants



P.15

DEPUIS PRESQUE 10 ANS, LE CNRS ACTEUR DANS LES PROJETS DE FA (2)

I 2 projets autres (Carnot, IRT)

I MELTED (2017-) : MaîtrisE de la quaLiTé des piècEs issues de fabrication aDditive

I FATAL (2015-2018) : Fabrication Additive en alliage de Titane et d'ALuminium

I 8 projets PEPS 2017 CNRS/DGA

Nom du Porteur	Intitulé laboratoire	Titre Long	Titre court projet
Andreas Borbely	LABORATOIRE GEORGES FRIEDEL	Analyse multi-échelle in situ et modélisation du DETENSIONNEMENT de pièces en IN718 élaborées par fabrication additive	DETENS
Frédéric Deschaux	Laboratoire de mécanique et génie civil	Mesure de température du bain liquide lors de la fabrication additive par fusion laser à l'aide d'un dispositif de pyrométrie bichromatique	BIChroAM
Cyril Mauclair	Laboratoire Hubert Curien	Caractérisation submicrométrique 3D de la rugosité des surfaces internes et externes de pièces in situ au cours de la fabrication additive par méthode optique FPM.	RugoMicro3D
Cécile Nouvel	Laboratoire Réactions et Génie des Procédés	Structures multimatériaux à zones d'amortissements spatialement contrôlées par impression 3D	SoftMultiMat 4D
Vincent Pateloup	Science des procédés céramiques et de traitements de surface	Orientation automatique de pièces céramiques élaborées par stéréolithographie. Le projet propose l'élaboration d'outils informatiques permettant d'automatiser le procédé de fabrication de pièces céramiques par stéréolithographie.	BAPSTER
Fernando Pedraza	Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement	Finition des SURFACES de superalliage élaboré par fabrication additive	SURF
Benoît Roman	Laboratoire de physique et mécanique des milieux hétérogènes	"Matière stimulable par fabrication additive : nano-impression 4D multi-matériaux	Nanoprint4D
Myriam Zerrad	Institut Fresnel Marseille	Impression 3D Instantanée	I3DI

<https://www.cnrs.fr/insis/recherche/actualites-institutionnelles/2017/03/peps-dga-2017.htm>

I Thèses ministérielles et CIFRE



P.16

QUELQUES

CAS CONCRETS

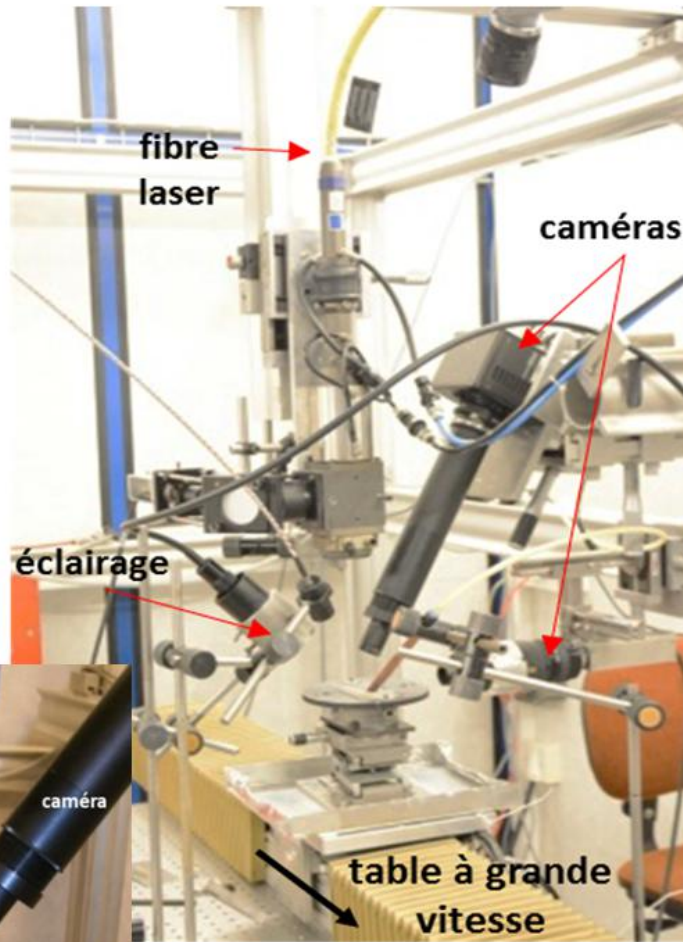
LES BANCS INSTRUMENTES : UNE COMPLEMENTARITE AVEC LES MACHINES



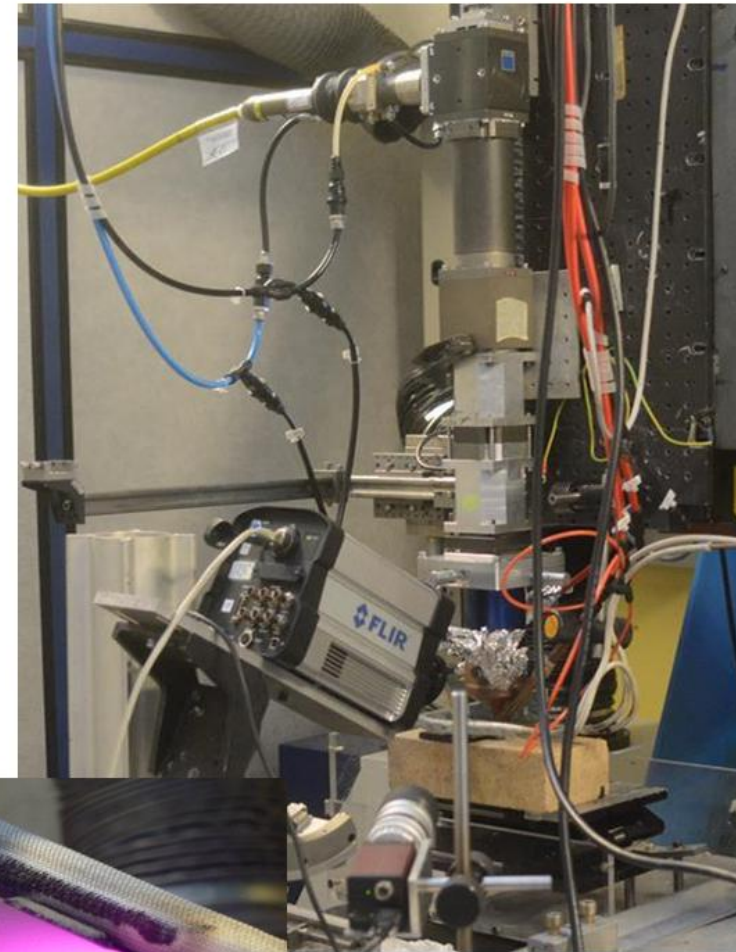
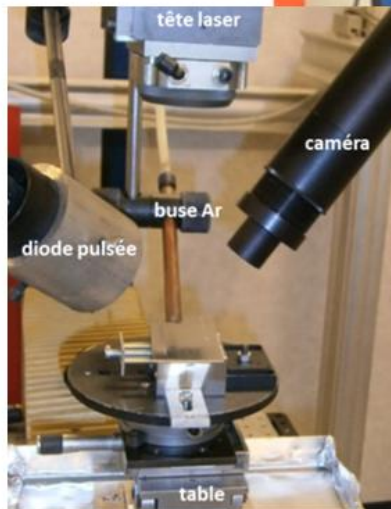
P.17



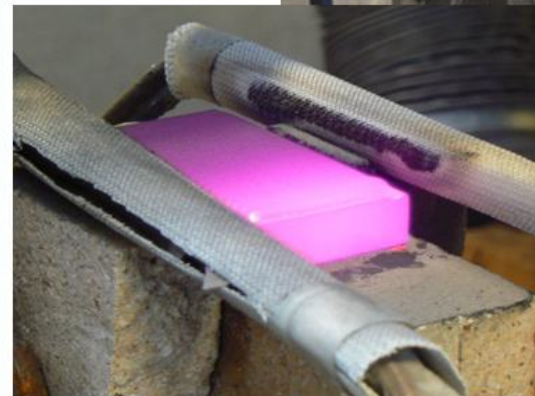
UMR8006



**Banc Instrumenté
de LBM**



**Banc Instrumenté
de DMD**



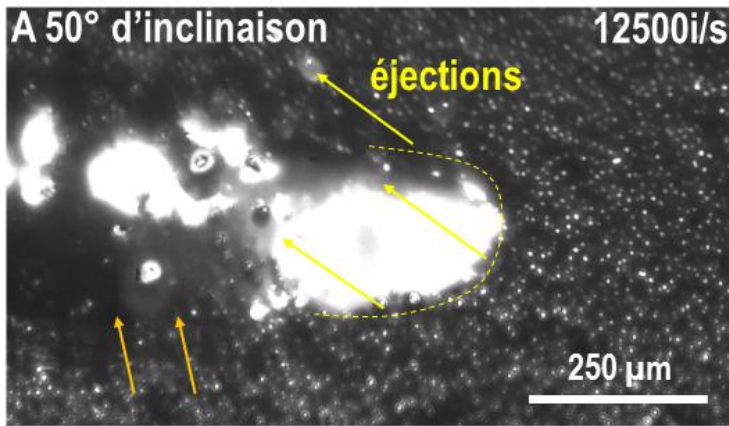
ETUDE DE L'INTERACTION LASER/POUDRE/ZF EN SLM (V.GUNENTHIRAM)^[1]



P.18

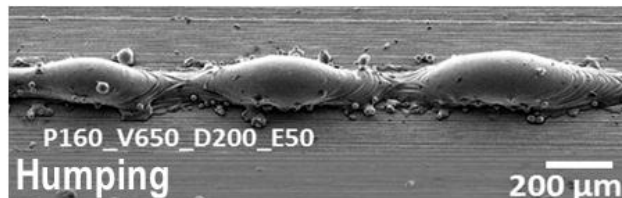
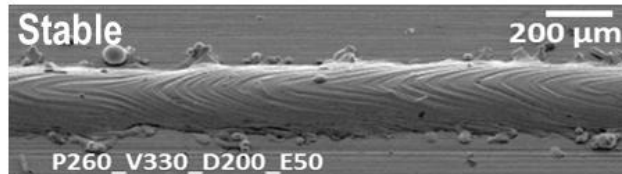


UMR8006

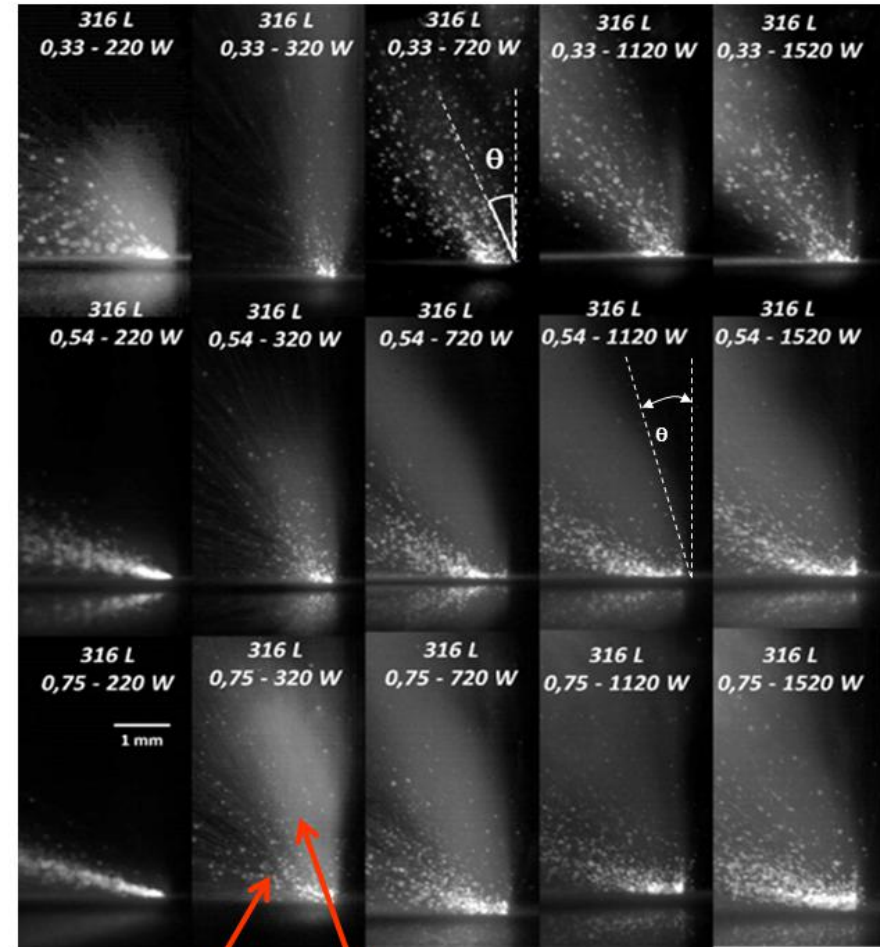


dénudation P = 520 W – V = 0,33 m/s

Observation de la zone fondue en SLM



Etude de la stabilité du procédé



éjections vapeur

Etude des éjections

V ↗
↓

P ↗ →

CVFA

2- Design

3- Matériaux

4- Procédés

6- Caractérisation

MATERIAUX

316L

Alliage d'aluminium

PROJET BLANC ANR ASPECT (M.GHARBI)^[2]

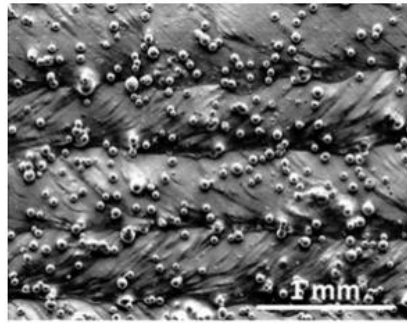
AMELIORATION DES ETATS DE SURFACE DES PIECES OBTENUES EN FDL



P.19



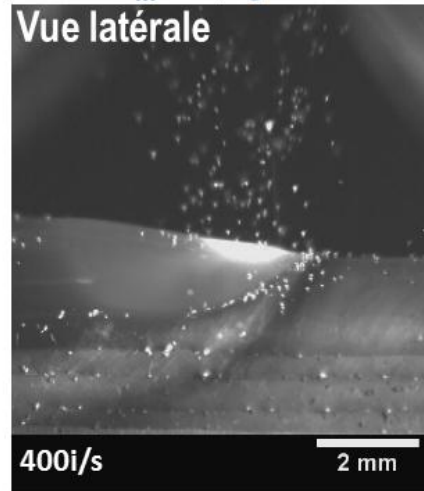
UMR8006



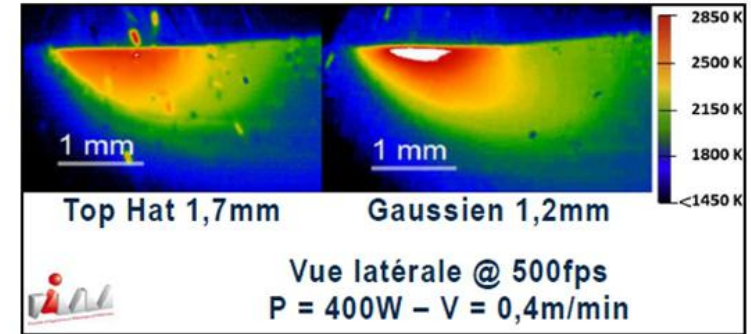
Analyses de surface
(R, W)

Meilleur Ra obtenu
 $\leq 5\mu\text{m}$

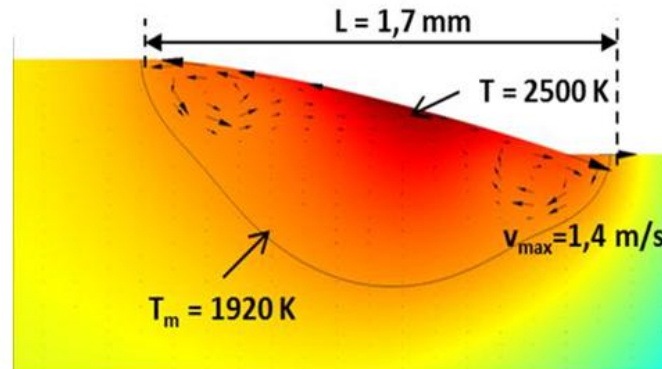
$P = 600\text{W} - V = 3,33\text{mm/s}$
 $D_m = 2,5\text{g/min}$



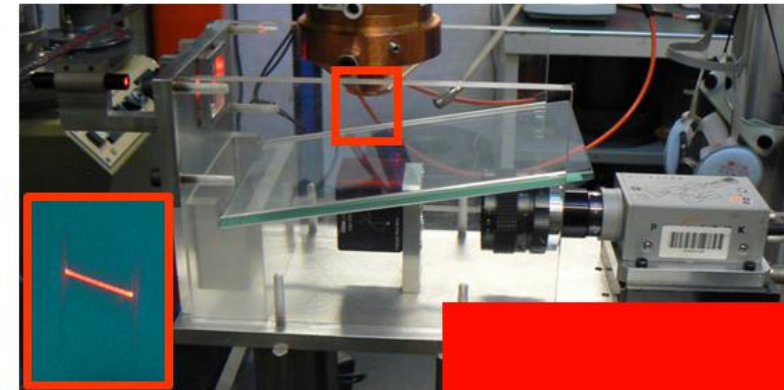
Observation de la zone
fondue en LMD



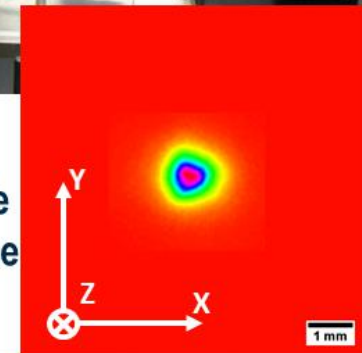
Température de la zone fondue par
pyrométrie optique



Simulation du procédé



Caractérisation du jet de
poudre en sortie de buse



CVFA

2- Design

3- Matériaux

4- Procédés

6- Caractérisation

MATERIAUX

Ti6Al4V

316L

COMPOSITES A MATRICE TITANE EN LMD (S.POUZET)^[3]



P.20



UMR8006



CENTRE DES MATERIAUX
P. M. FOURT
UMR7693

CVFA

2- Design

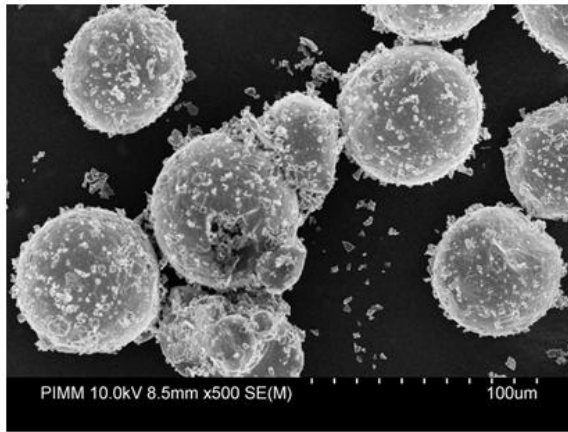
3- Matériaux

4- Procédés

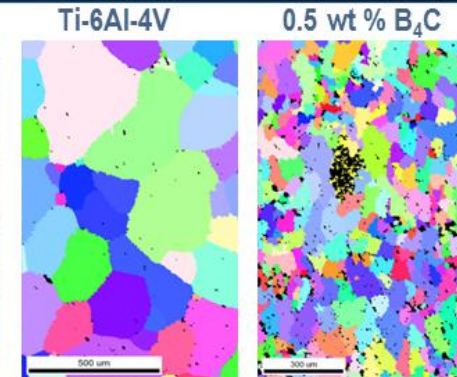
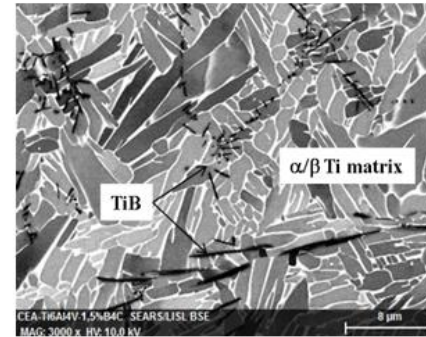
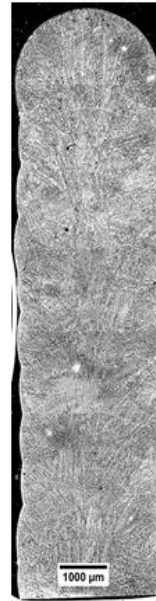
6- Caractérisation

MATERIAUX

CMM Ti6Al4V



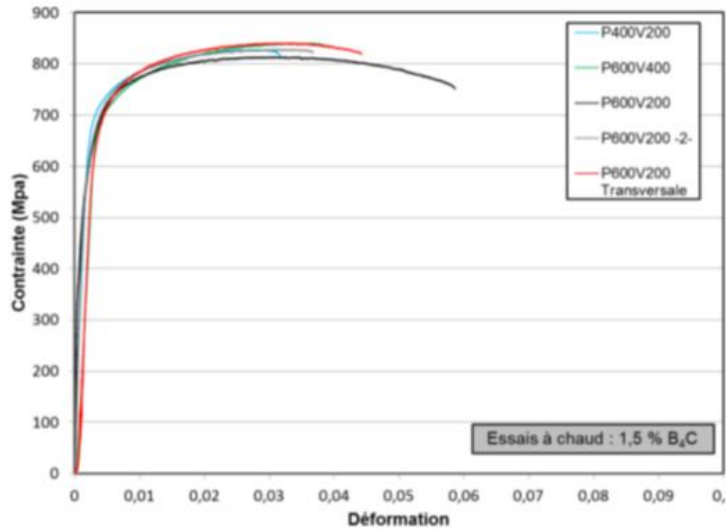
Grains de Ti6Al4V (45-75µm)
incrustés de TiC (<4µm)



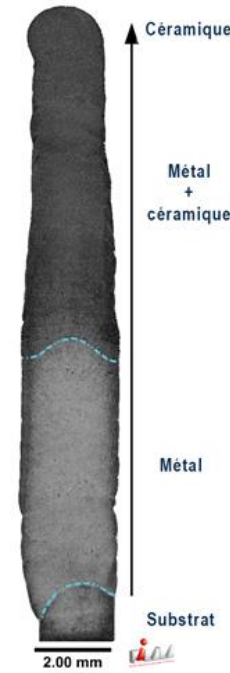
< 150 µm >

< 35 µm >

Caractérisation microstructurale (MEB/EBSD)



Caractérisation mécanique à 500°C



Gradient de composition



Elaboration d'une pièce test
en composite

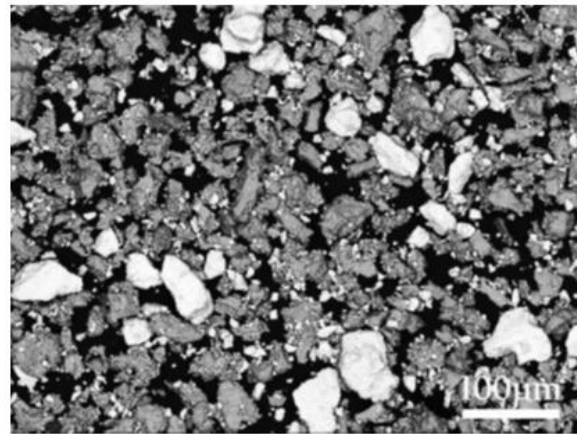
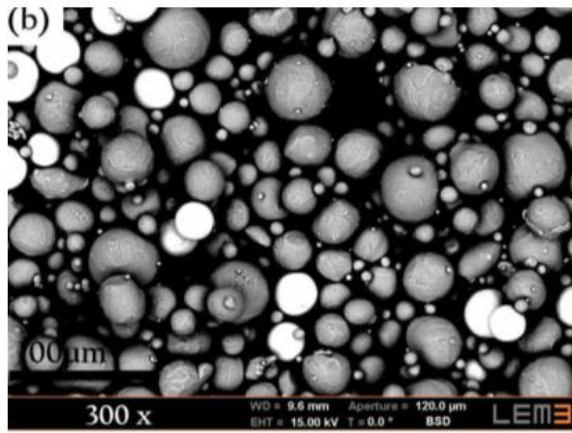
ALLIAGES DE TITANE IN SITU ET STRUCTURES ARCHITECTUREES PAR SLM (M.FISCHER)^[4]



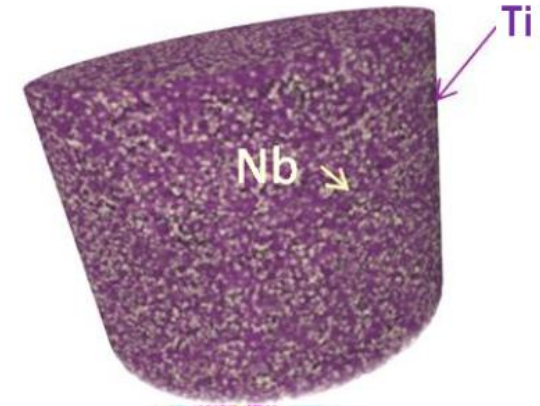
P.21

LEM
UMR7239

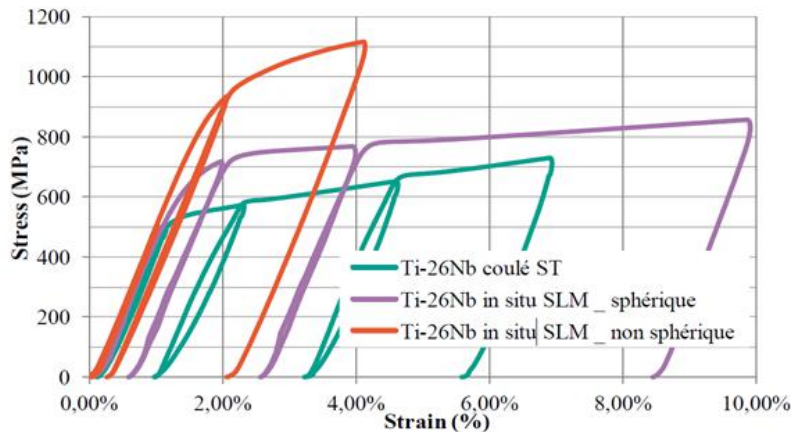
UMR 6303
ICB
UMR7693



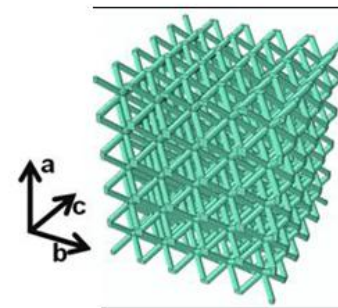
Etude comparative poudre sphériques et non-sphérique de Ti-26Nb (%at.)



Vérification de l'homogénéité du mélange par tomographie X



Essais de compression
(mise en évidence de l'action du taux d'oxygène)



Comparatif simulation et expérience d'optimisation d'architecture pour implant

- CVFA
- 2- Design
- 3- Matériaux
- 4- Procédés
- 6- Caractérisation

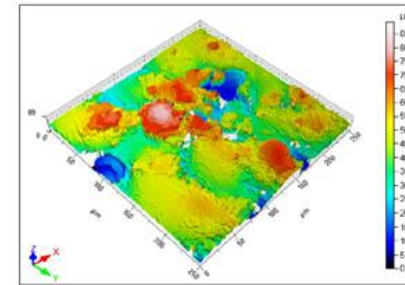
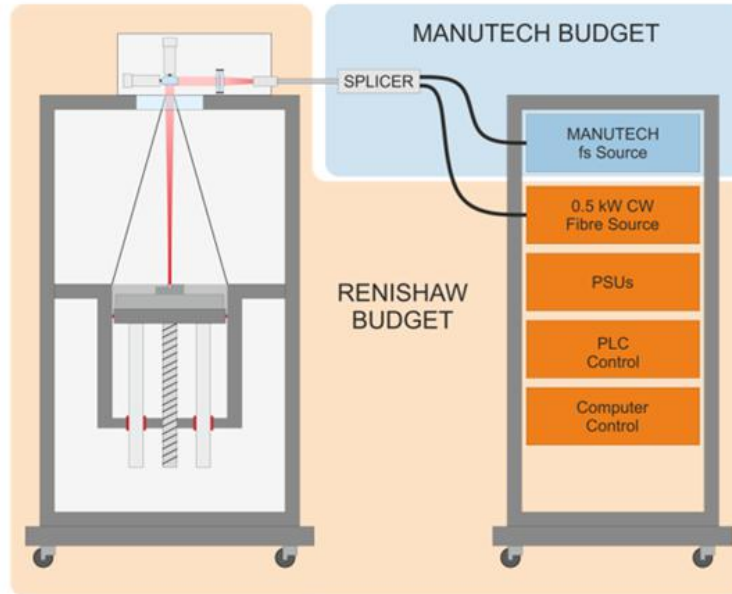
MATERIAUX
Titane
Nobium

PROJET INSTEAD (1)^[5]

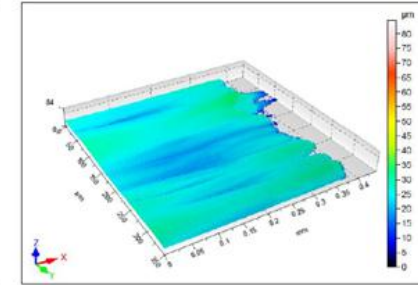


P.22

EQUIPEX
MANUTECH USD

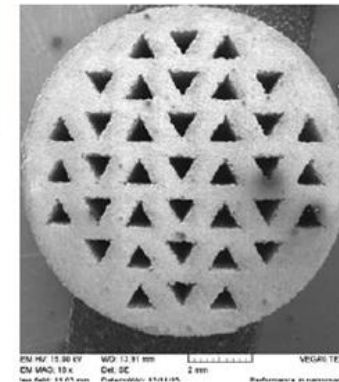
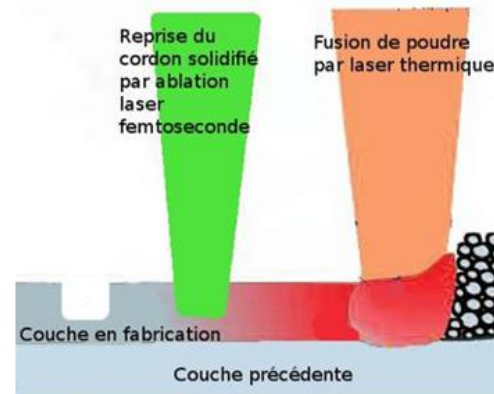


$Ra = 5,38\mu m$

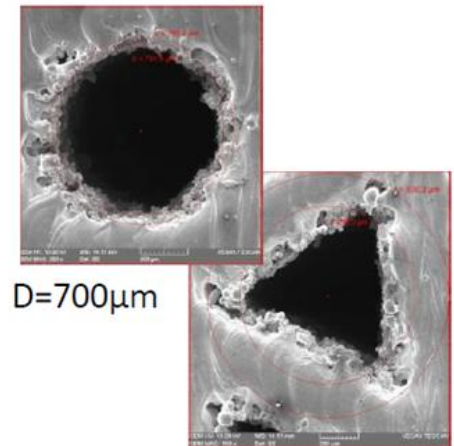


$Ra = 0,52\mu m$

Machine RENISHAW équipée d'une double source (brevet)



10,7 x 5mm



D=700μm

Objectif : améliorer l'état de surface interne par texturation (ripples)

- CVFA
- 2- Design
- 3- Matériaux
- 4- Procédés
- 5- Post traitement
- 6- Caractérisation

MATERIAUX
Ti6Al4V
Aciers inox

PROJET FALAFEL : ETUDE DU CONTRÔLE DE PROCÉDE DE PROJECTION LASER (R.MEZARI)^[6]



P.24



UMR8006



CENTRE DES MATERIAUX
P. M. FOURT
UMR7693



UMR7693



CVFA

2- Design

3- Matériaux

4- Procédés

5- Post traitement

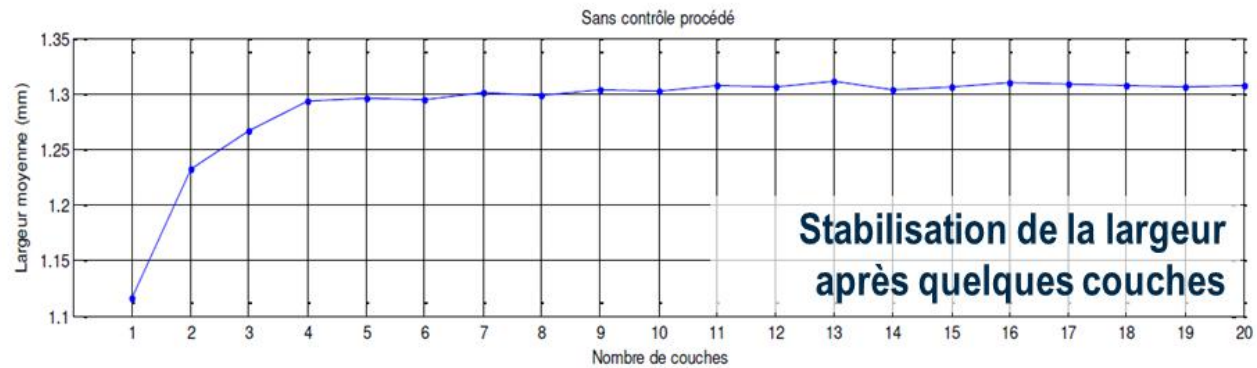
6- Caractérisation

8- Big Data

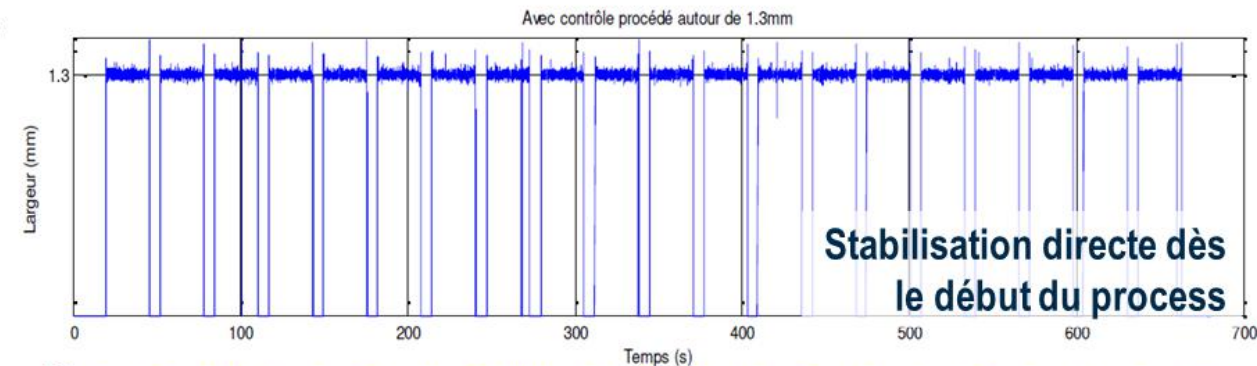
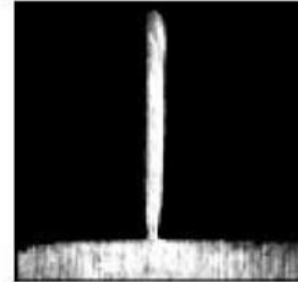
MATERIAUX

Ti6Al4V

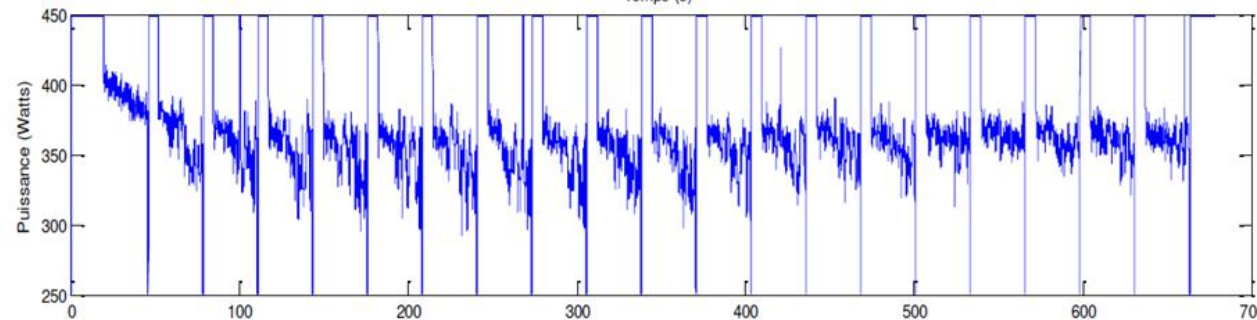
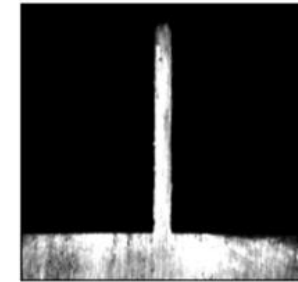
Bases nickel



Stabilisation de la largeur
après quelques couches



Stabilisation directe dès
le début du process



Action sur la puissance laser



www.cnrs.fr

MERCI DE VOTRE ATTENTION

Désolé pour ceux que j'ai oublié dans ma présentation... 😊



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES



P.27

I [1] **V.GUNENTHIRAM** : Compréhension de la formation de porosités en fabrication additive (LBM). Analyse expérimentale de l'interaction laser – lit de poudre – bain liquide.

I [2] **M.GHARBI** : Etats de surface de pièces métalliques obtenues en Fabrication Directe par Projection Laser (FDPL) : compréhension physique et voies d'amélioration.

I [3] **S.POUZET** : Fabrication additive de composites à matrice titane par fusion laser de poudre projetée.

I [4] **M.FISCHER** : Élaboration in situ d'alliages de titane et de structures architecturées par fabrication additive : application aux dispositifs médicaux implantables.

I [5] **O.ROFIDAL** : MANUTECH : Le laser femtoseconde au service des besoins industriels (Laser'Ape 2017).

I [6] **R.MEZARI** : Etude du contrôle de procédé de projection laser pour la fabrication additive : Instrumentation, Identification et Commande.

I **Cartographie des acteurs clés de la R&D en fabrication additive** (Carnot filières Manufacturing)

LISTE DES PROJETS ANR TRAITANT DE LA FA



P.28

- I **ANR Blanc MF2** (2012-2015) : Mécanismes de Frittage Flash dans les matériaux métalliques
- I **ANR Blanc ANiM** (2011-2014) : Matériaux architecturés Ni-Ti
- I **ANR Blanc ARCHIFUN** (2012-2014) : Corrélations entre Architecture, Interfaces et Fonctionnalités dans les multi-matériaux Ferroélectriques: Frittage Flash et caractérisations multi-échelle 3D
- I **ANR FA2SCINAE** (2015-2018) : Fabrication Additive et FAigue de Structures Cellulaires Intégrées en Aeronautique
- I **ANR MOSART** (2015-2017) : Mise en Oeuvre de Structures Architecturées Refroidies par Transpiration
- I **ANR COFFA** (2018-2020) : Conception et Optimisation de Forme pour la Fabrication Additive
- I **ANR GEOCAM** : Maîtrise géométrique des pièces produites par fabrication additive métallique (2017-2020)
- I **ANR ASPECT** (2010 – 2012): Amélioration des états de Surface des pièces obtenues en fabrication dirECTe par laser

LISTE DES PROJETS FUI ET AUTRE TRAITANT DE LA FA



P.29

- I **MOSAIQUE** : Mise en OEuvre par fabrication laSer de mAtériaux et archlctures avancés pour l'aéronautiQUE
- I **NENUFAR** (2015-2018): Nouveaux Emplois, Nouvelles Utilisations de la Fabrication Additive en Réparation
- I **FALAFEL** (2010-2014) : Fabrication Additive par LAser et Faisceau d'ELectrons
- I **3D HYBRIDE** (2017-): Machine HYBRIDE d'impression 3D métal couplant fonctions additive (SLM) et soustractive (laser ultracourt)
- I **ALMEE** (2017-): Aluminium Additive Layer Manufacturing pour Equipments Electroniques
- I **ALMINCO** (2016-2018) : Additive Layer Manufacturing for Nickel Based Superalloy INCO718LC
- I **COMPO** (2018-): COnception pour la Métallurgie des POudres de conteneurs innovants
- I **SOFIA** (2016-2020) : SOLutions pour la Fabrication Industrielle Additive métallique
- I **FAIR** (2016-2019) : Fabrication Additive pour Intensification de Réacteurs
- I **FADIPERF** (2011-2013) : Fabrication Additive D'Implants Personnalisés et/ou Fonctionnalisés