



**HAL**  
open science

# Fabrication Additive: Interaction Faisceaux Haute Energie - Matière

P. Aubry

► **To cite this version:**

P. Aubry. Fabrication Additive: Interaction Faisceaux Haute Energie - Matière. Journées SF2M "Fabrication Additive", Nov 2015, Paris, France. cea-02509724

**HAL Id: cea-02509724**

**<https://cea.hal.science/cea-02509724>**

Submitted on 17 Mar 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea den

# Fabrication Additive :

## Interaction Faisceaux Haute Energie - Matière

Pascal Aubry

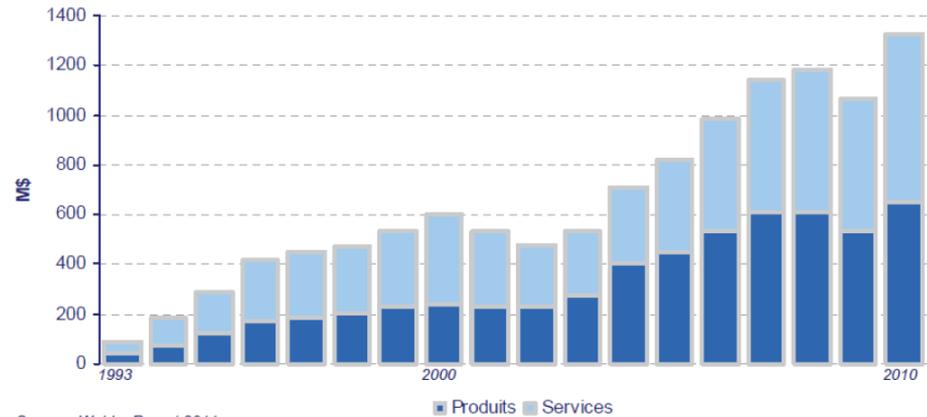
Pascal Aubry

DEN//DANS/DPC/SEARS/LISL

18-19 NOVEMBRE 2015

## Un fort intérêt industriel 1993-2010

Evolution des revenus de la FA (1993-2010)  
(Ref. CETIM-CERTEC)



Source : Wohler Report 2011

2011-2012 : Annonces fortes aux Etas-Unis (puis en Chine)

**Advanced Manufacturing Initiative**



The Economist, Februar 2011



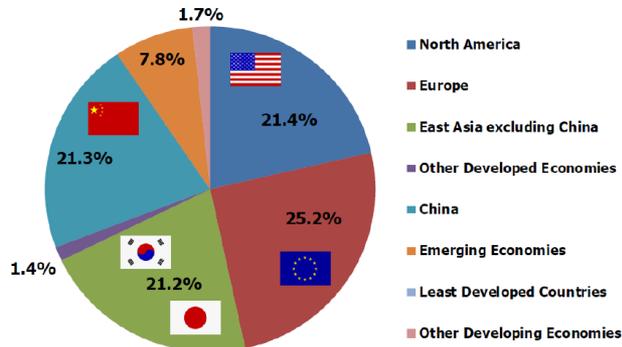
The Economist, April 2012

## Un croissance forte du domaine de R&D

- Une présence forte des principaux acteurs
- La Chine en progression très rapide
- Une présence européenne centrée sur l'Allemagne

### The International Laser Market – Geography

China's significance is increasing – generally and in the laser market



Source: Strategies Unlimited

STATUS AND PERSPECTIVES, Klaus Löffler

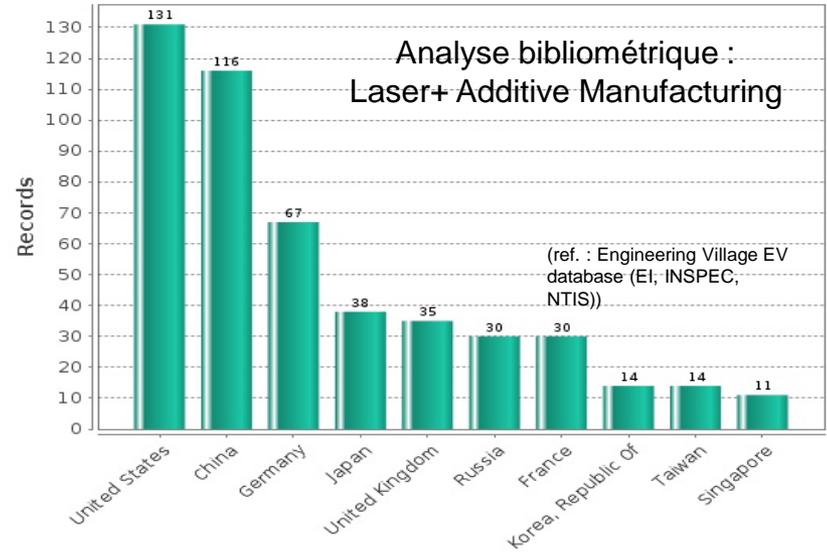
07.05.2014

7

• USA : Advanced Manufacturing Initiative (2012)

• Création de nombreux centres liés à la fabrication additive en Chine (2013-2014)

### Country



© 2014 Elsevier Inc.



## Fabrication Additive Métallique/Céramique



### Fabrication Additive

#### Lit de poudre

#### Projection poudre

#### Fil

#### Laser

#### Faisceau Electrons

#### PTA,PTAW

#### Laser

#### Laser

#### Faisceau Electrons

#### PTAW, TIG...

Realizer

EOS

Concept Laser

3D System

SLM Solutions

Renishaw

ARCAM

Arcam Q20

Trumpf

BEAM

EFESTO

OPTOMECC

SCIAKY

Titanium Norsk Corp.

## Fabrication additive par faisceau d'électrons

### ① Fusion sélective « lit de poudre » (EBM)

Procédé de fusion FE lit de poudre sous vide + Préchauffage FE



lit de poudre pré-compacté

Avantage: santé matière (dégazage de l'O<sub>2</sub>)



Intérêt sur les alliages de titane



Q10  
Arcam Q10

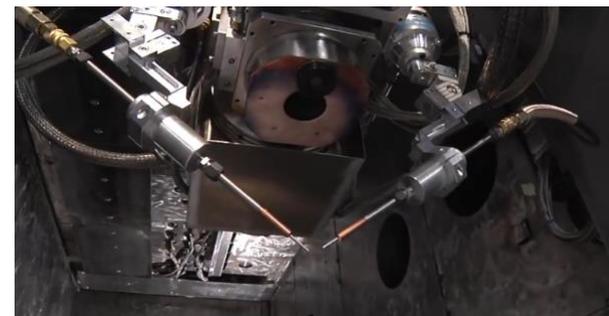


Implant crânien

### ② Fusion de fil par FE

Machine « Sciaky »

- Sous vide
- 100% matière fusionnée
- Grandes dimensions

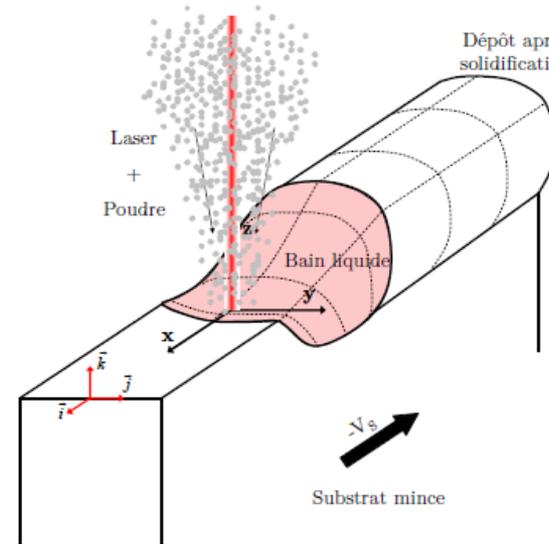
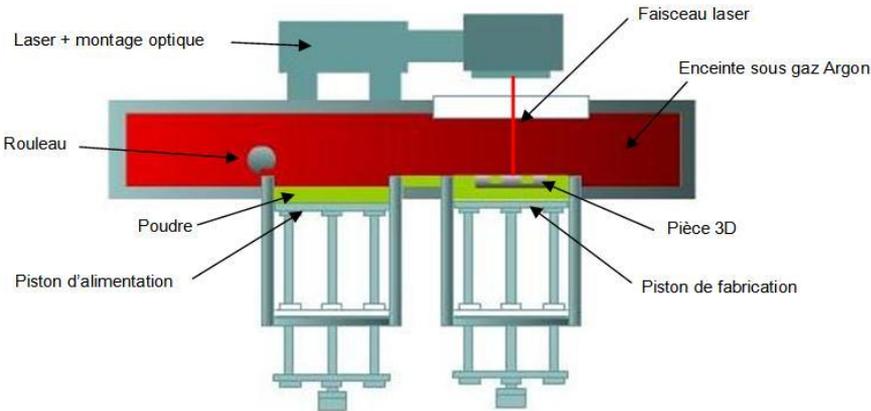


(Ref. <http://www.arcam.com/>)

## Fabrication additive par laser

### ① Fusion sélective « lit de poudre » (SLM/SLS)

### ② Fusion de Poudre projetée (DMD) / Fil



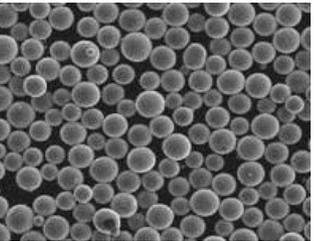
### Métaux (SLM) & Polymères (SLS)

Avantage : géométries plus complexes

Parois > 0,1 mm, hauteur des couches > 25 μm

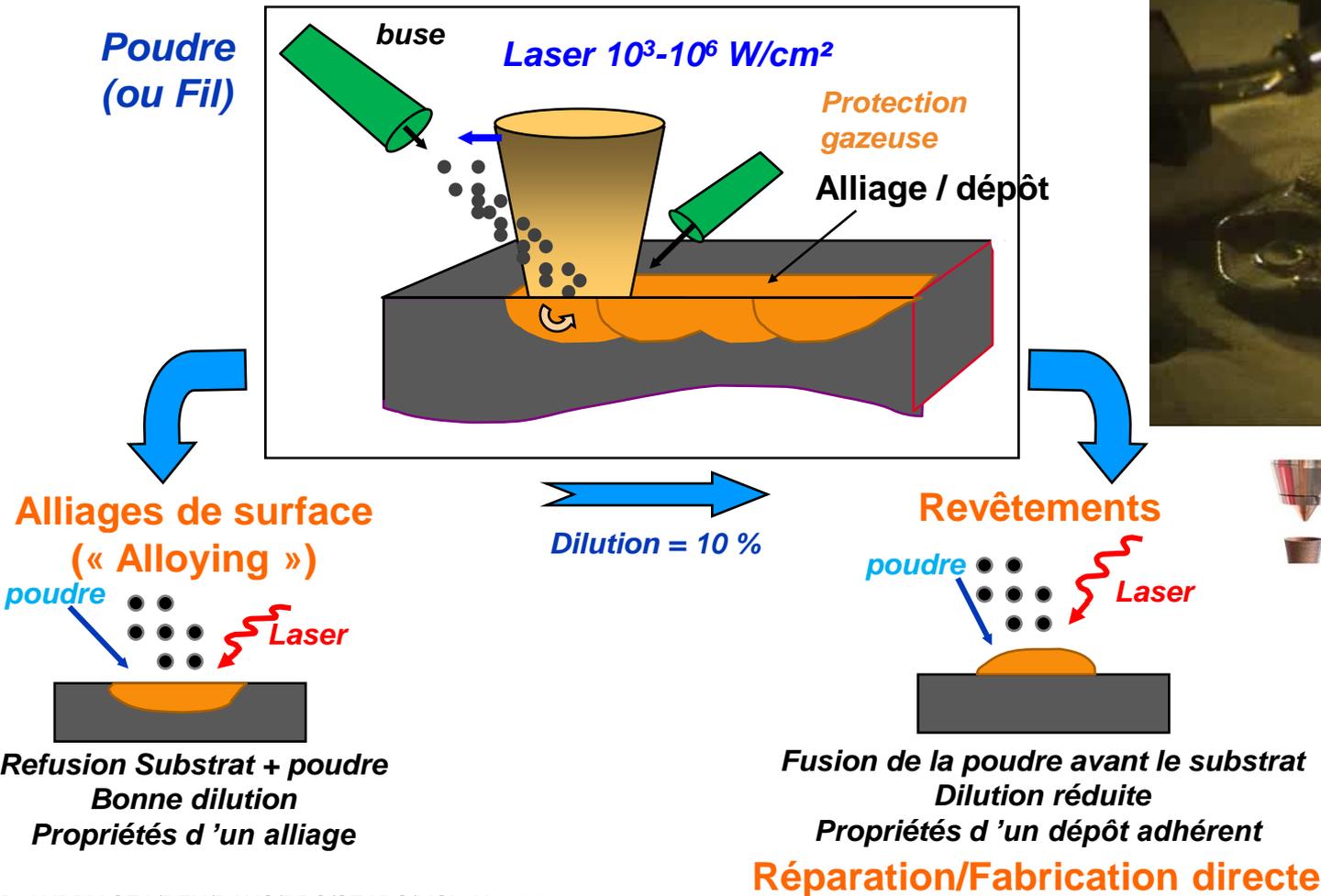


**Métaux** : Ti, Al, Fe, Ni  
 Avantages : Rapidité, matériaux à gradients  
 Parois > 0,5 mm, Δh > 0,2 mm



## Principe

Laser Cladding, Direct Metal Deposition, Laser Metal Deposition, Directed Energy Metal Deposition

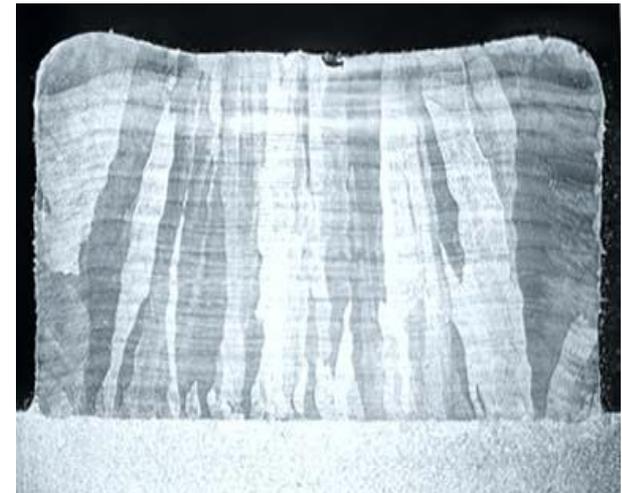


## Développement matériaux

- Grand nombre de matériaux développés/évalués
- Différents niveaux de connaissance/maturité

Principaux alliages			
Base	Alliage	Base	Alliage
Titane	CP Ti	Acier	H13
	Ti 6-4		S7
	Ti 6-2-4-2		17-4PH
	Ti 6-2-4-6		PH 13-8 Mo
Nickel	625, 713, 718	Aluminum	304, 316, 420, 904L
	Hastelloy X		4047, 7075
Cobalt	Stellite	Cuivre	Ci-Ni
Autres alliages			
Base	Alliage	Base	Alliage
Titane	Ti 48-2-2	Acier	A2
	Ti 22Al-23Nb		15-5PH
Nickel	600 & 690		309, 410, 416
	Haynes 188 & 230		MM 10
	MarM 247	CPM 10V	
	CMSX-3, CMSX-4	Aermet 100	
	Waspalloy	GRCop-84	
	Rene 142 & N5	Cuivre	Cu-10% Sn
Autre : Pure W, V, Mo, Ta, Re, Nb, Mo-Si, B, Nb-Si, C103, Norem, Colmonoy, Triballoy 700			

Globalement : anisotropie de texturation direction de construction/directions transverses

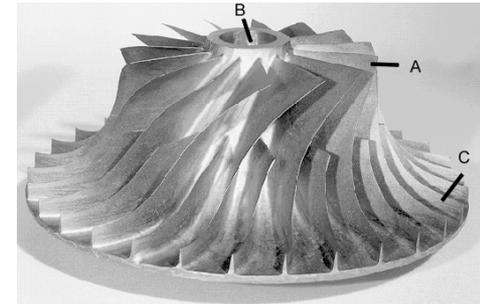


Projection laser échantillon TA6V  
(Ref. P. Aubry, ANR PROFIL)

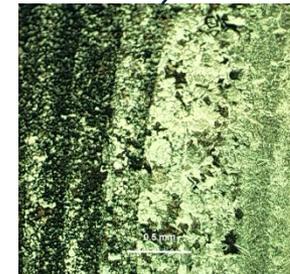
## Développement matériaux

- Matériaux à gradient de composition
- Matériaux composites à matrice métallique

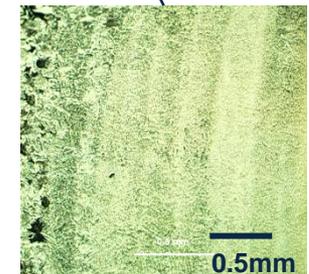
### Fabrication de composant à gradient de composition 3D



A- Zone d'impact : Alliage Ti classique (Ti 6-2-4-2)  
 B- Fatigue : Alliage Ti Orthorombique (Ti 22-23)  
 C - Fissuration ; Gamma Ti-Al (Ti 48-2-2)



Ti-6-2-4-2



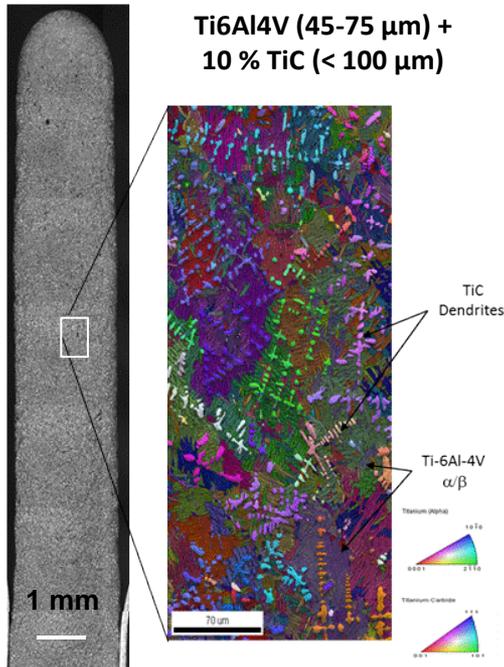
Ti-22-23

(Ref. OPTOMECC)

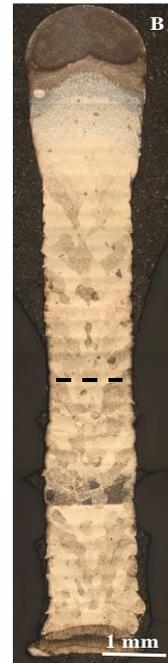
### Elaboration de Composites à matrice Titane

### Transition à gradient de composition

- Etude de la transition Ti/Ni (TA6V/Inco718)



(Ref. PIMM, AMPT, S. Pouzet, coll. Mines)  
 S. Pouzet et al. , ICALEO'13, (2013)

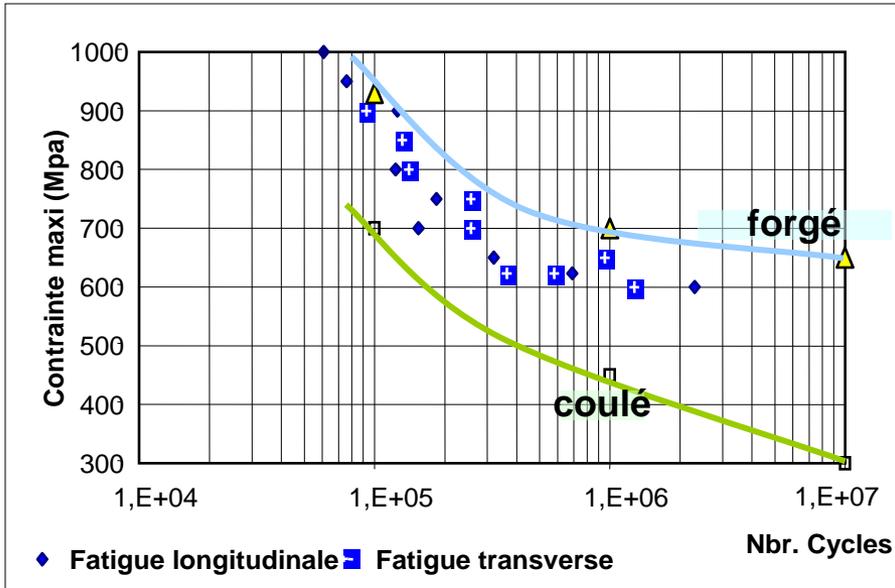


(Ref. PIMM, AMPT, P. Peyre, P. Aubry)

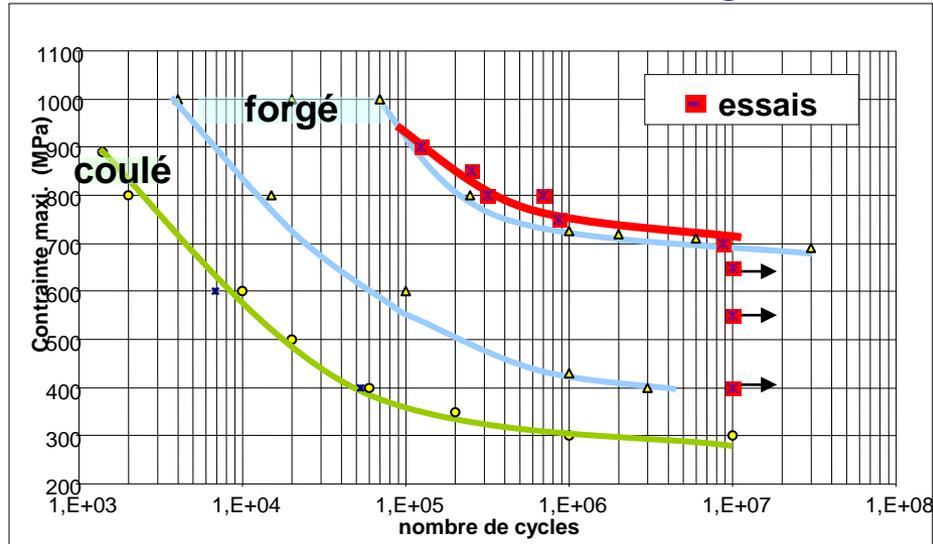
## Comportement mécanique des matériaux

Essai fatigue TA6V

Essai fatigue Inconel 718



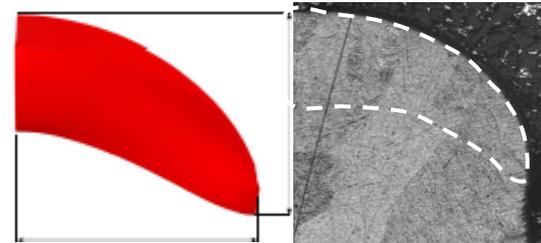
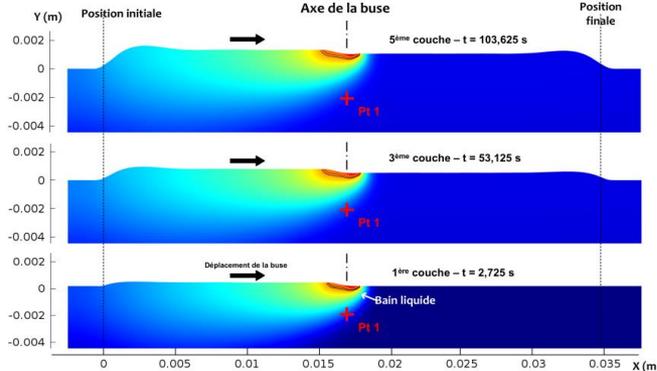
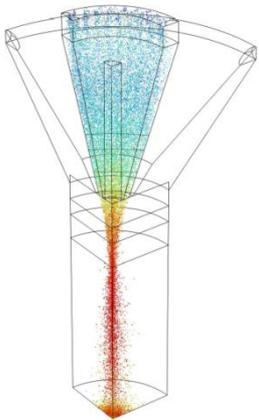
(Ref. LENS OPTOMEC)



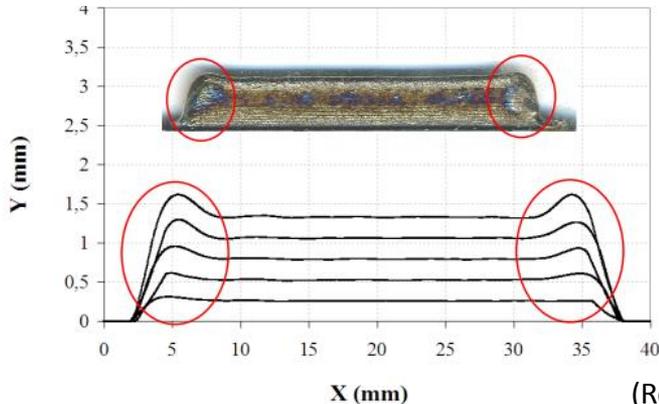
(Ref. P. Aubry, ANR PROF1)

Matériau	Limite élastique (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Al. (%)
Ti 6-4 DMD	848	955	15
Ti 6-4 forgé typ.	883	952	14
316L DMD	276	661	67
316L forgé typ.	289	578	50
Inco 625 DMD	579	930	38
Inco 625 forgé typ.	400	834	30

## Modélisation/Simulation numérique du procédé



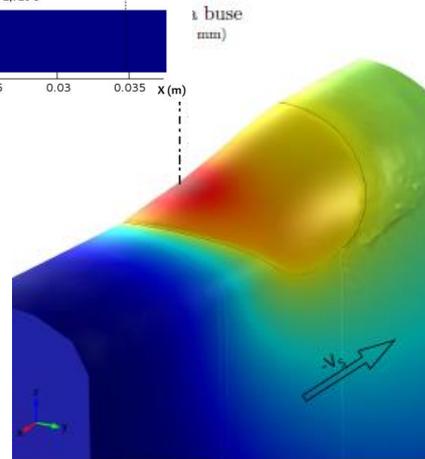
Simulation jet de poudre



Modèle 2D (20 couches = 6 h)

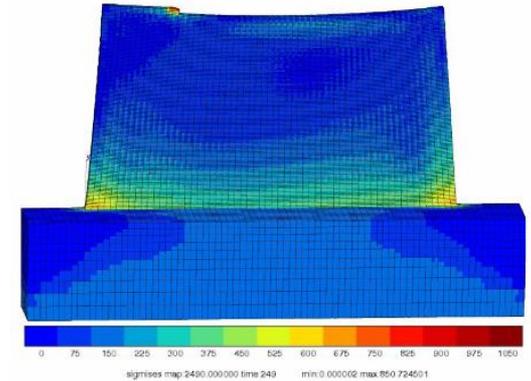


(Ref. ANR ASPECT, coll. LIMATB, thèse S. Morville, 2012)



Modèle 3D thermo-hydro (1 couche = 48 h)

(Ref. S. Morville, M. Carin et al., J. Las.Appl (2012))

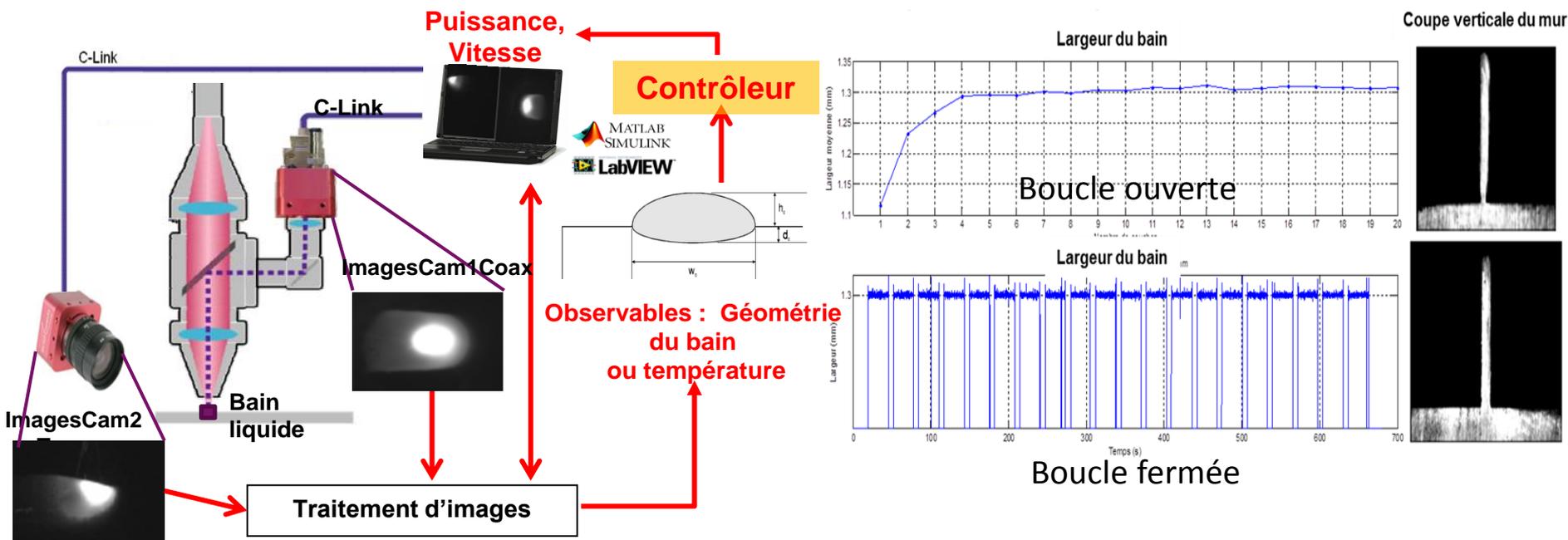


Calcul des contraintes (Von Mises)

(Ref. ANR PROFIL, A. Longuet ENSMP, 2010)

## Contrôle de procédé

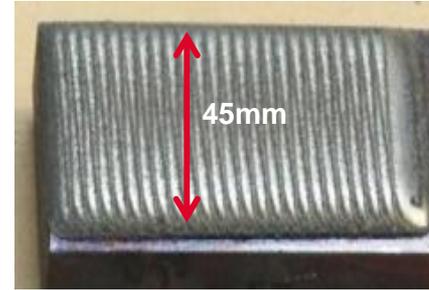
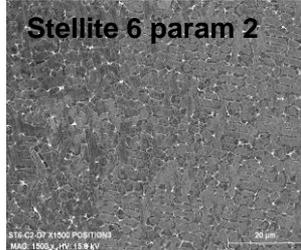
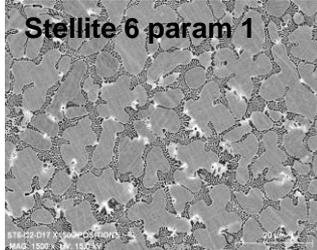
- Traçabilité de la fabrication
- Contrôle en ligne des défauts
- Contrôle en boucle fermée
- Maitrise des dimensions du bain liquide (outil de fabrication)
- Maitrise de la thermique/gradient thermiques/microstructure
- Action sur les principaux paramètres : Puissance laser, vitesse d'avance, débit de poudre...



## Revêtement/Réparation

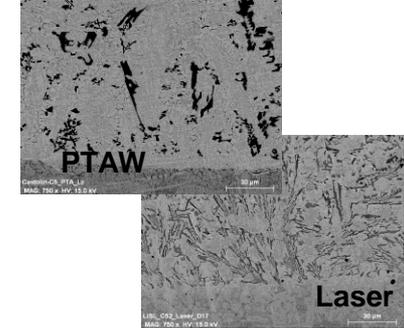
- Revêtement durs substitués de stellite

Contrôle et affinement de la microstructure

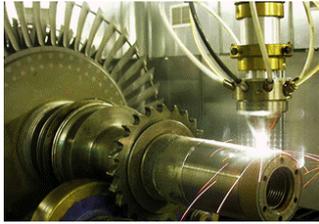


COLMONOY 52 (LC)

(Ref. P. Aubry)



- Réparation de composants mécaniques



(Ref. GE Oil & Gas)



(Ref. Hayden Corp.)



(Ref. Dalu Corp.)

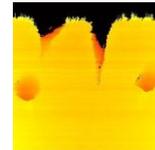
- Réparation de composants aéronautiques

Réparation de sommet d'aubes en superalliage monocristallins (AM1, CMSX1, CMSX2, CMSX3, MC2)

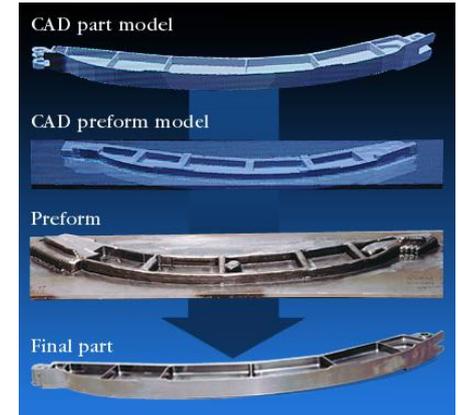
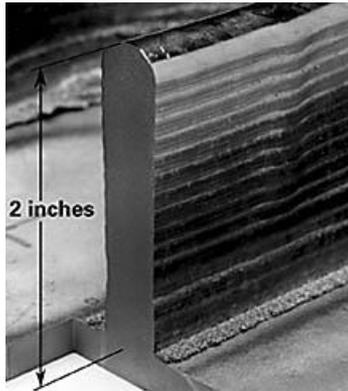
Réparation automatisées de sommet d'aubes  
Numérisation, génération automatique



(Ref. P. Aubry)

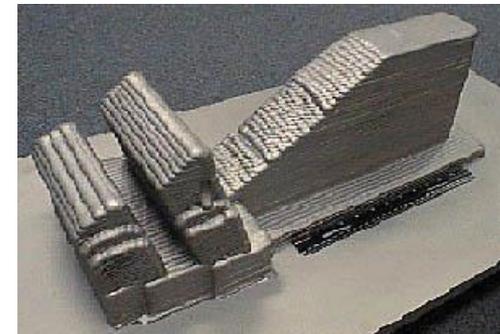


## Développements: Fabrication pièces de grandes dimensions



### Société AeroMet, MTS sub. (WA, USA) ~1997-2004

- Laser CO<sub>2</sub> 14-30 kW
- Enceinte de protection gazeuse
- Pièce ~2mx1mx1m
- TA6V, 5-6 kg/h,  $V_{\text{dépôt}}/V_{\text{global}}=1/6-1/7$



# PROJECTION LASER

## Développements : Géométrie et pièces de grandes dimensions

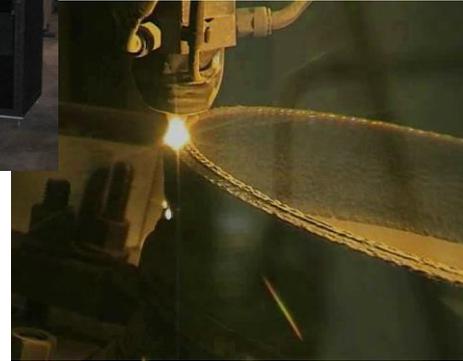
- **Projet ANR PROFIL** (GIP GERALP : CEA,CNRS,DGA...)



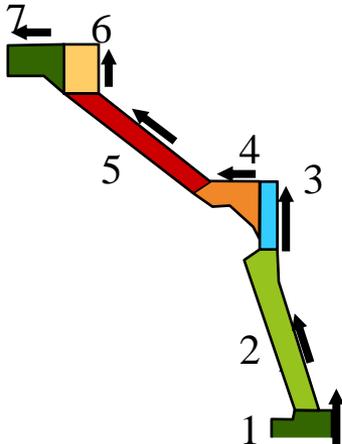
- Pièces aéronautiques
- TA6V/Inco718
- 2D/3D
- Evaluation des capacités de la projection laser



Système de projection laser grandes dimensions  
OPTOMECS (atmosphère contrôlée)  
Arts et Métiers ParisTech



### Carter en Inco718



(Ref. P. Aubry)

## Développements : Fabrication pièces de grandes dimensions



Cadre supports pour fighter-4 J-20 or J-31 stealth fighter Y-20 Strategic Airlifter, J-15 carrier-borne fighter, C919 airliner



(Ref. Biehang Univ.)



(Ref. Northwestern Polytechnical Univ.)



(Ref. EFESTO) pièce TA6V



### • Installation TIG

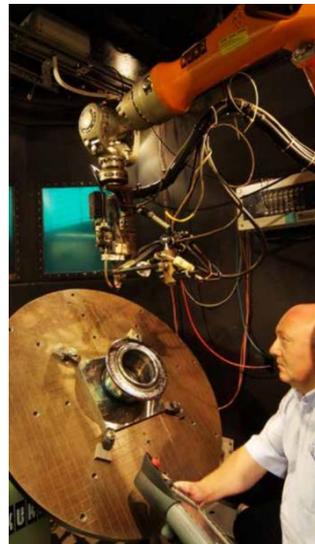
- Fabrication/ajout structures creuses,
- Robot Kuka + 2 axes
- TIG fil froid
- Table : ~1.6m2



NUCLEAR AMRC  
ADVANCED MANUFACTURING RESEARCH CENTRE

### • Installation Laser

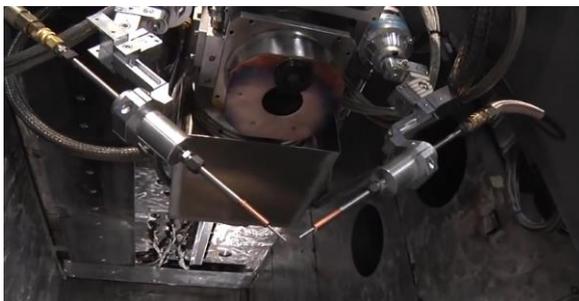
- "civil nuclear pressure vessels"
- R&D laser cladding
- 10 x 10 x 5m
- 15kW Laserline fibre-coupled diode laser.
- Low dilution, low distortion.
- 10kg/h
- Portique+bras robotisé
- Diamètre max : 3m
- Charge max : 1 tonne



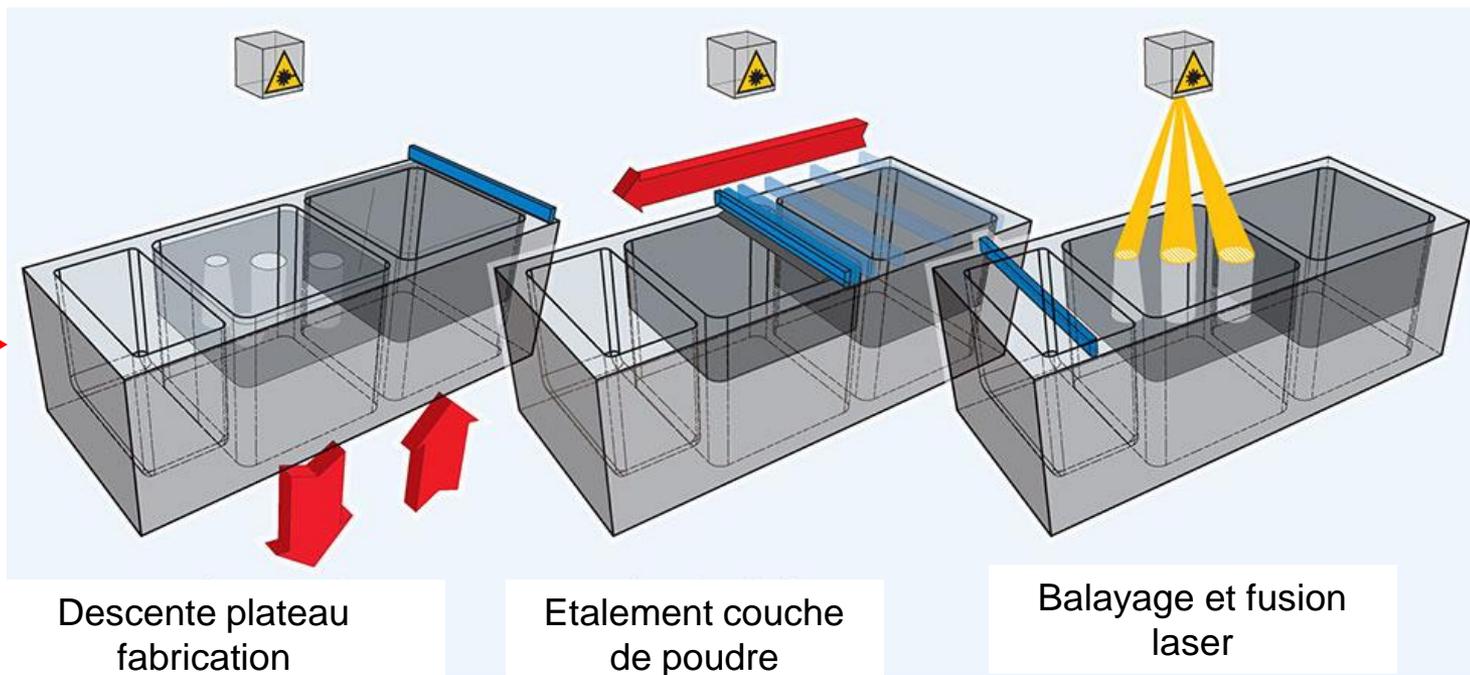
(Ref. Nuclear AMRC)

## Machine société Sciaky

- Fusion de fil par faisceau d'électron
- Enceinte  $\sim 5,8\text{m} \times 1,2\text{m} \times 1,2\text{m}$



## Principe



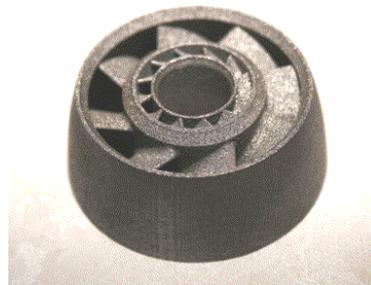
- Plateau de fabrication : 100mmx100mm-600x400mm
- Profondeur : 100mm-400mm
- Laser fibre : 100W-1kW
- un ou plusieurs scanners
- Dispositif de mise en couche : rouleau ou raclette (métal, céramique, silicone, fibres,...)

## Développements matériaux

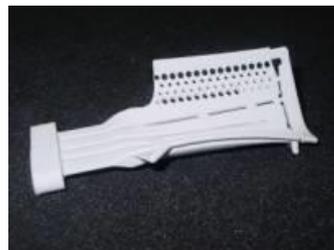
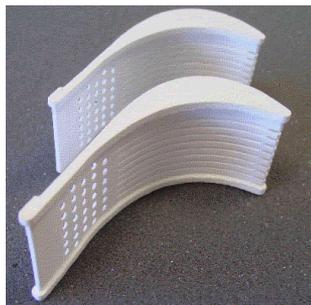
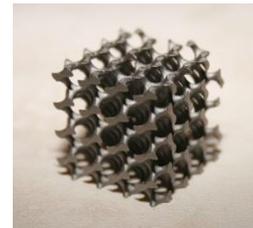
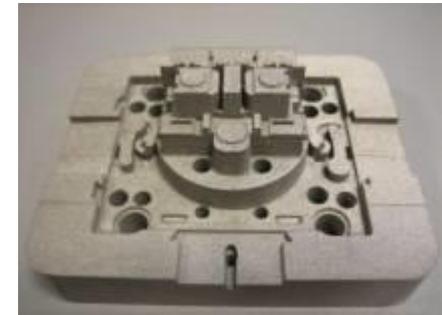
- Fe alloys: 904L, 316L, 1.2343, 17-4PH, 100C6
- Ti alloys: TA6V
- Ni alloys: Inco718,C263
- CrCo : Stellite12, Stellite 6
- Céramiques : Alumine, Zircone,SiC,...



Machine PM250 Phenix Systems  
Arts et Métiers ParisTech



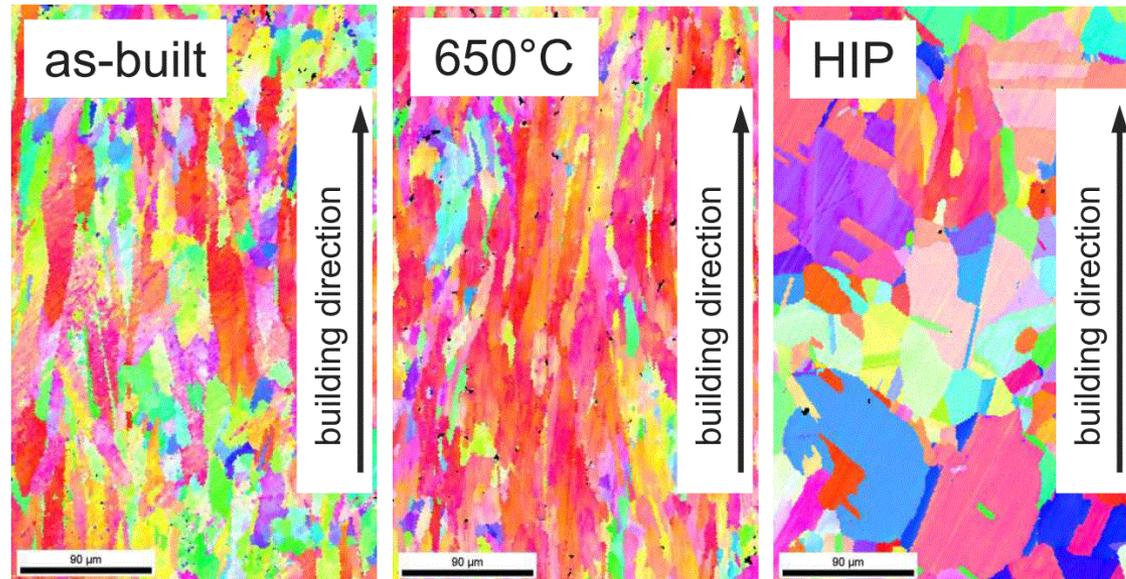
(Ref.P. Aubry)



## Comportement mécanique des matériaux

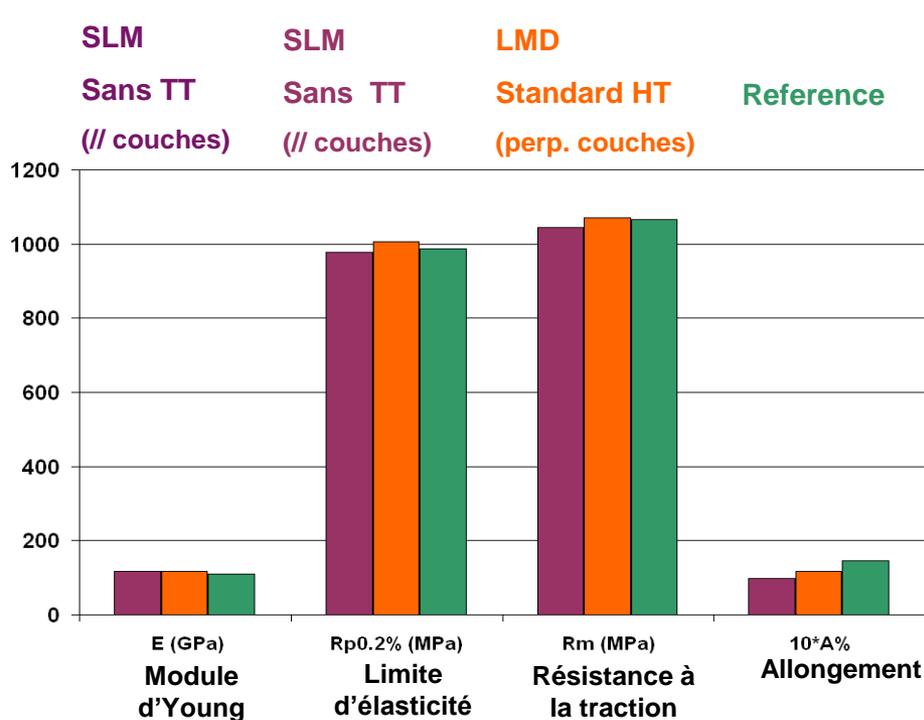
### Exemple 316L

condition	UTS/MPa	YS/MPa	Elong %
Brut de SLM	565+/-5	462+/-5	53.7+/-3
650°C	595+/-5	443+/-5	48.6+/-3
Reference	530-680	220	40

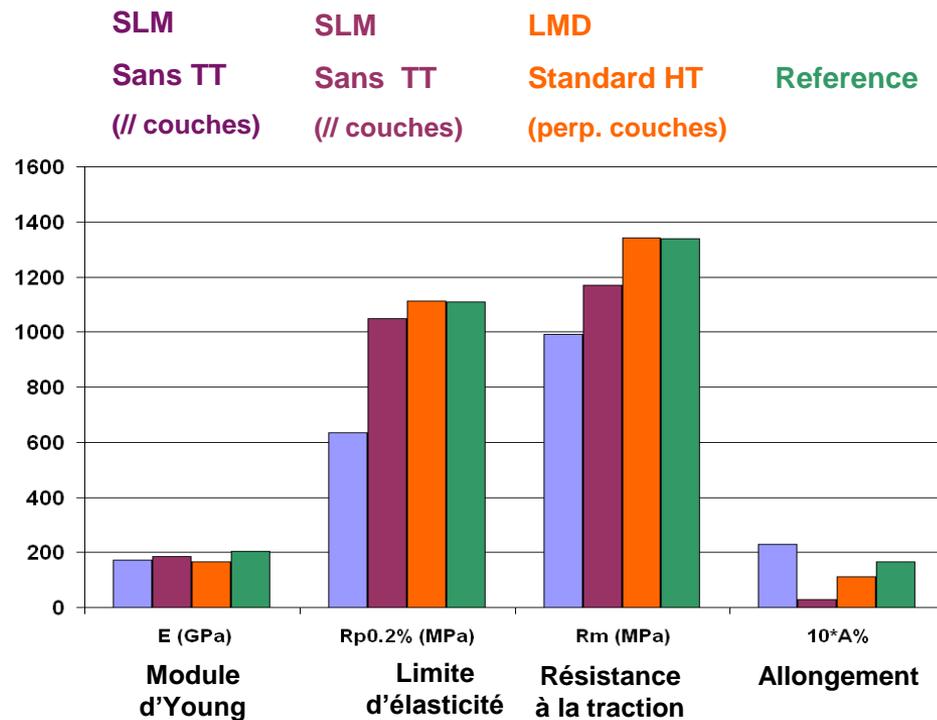


(ref. T. Niendorf & al., « On the fatigue performance of materials processed by SLM: bulk material and lattice structures », Fatigue 2014)

## Comportement mécanique des matériaux



**TA6V4**



**Inco718**

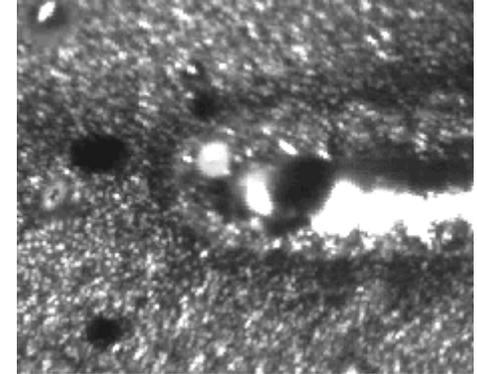
(Ref. P.Aubry, Projet ANR PROFIL)

## Modélisation/Simulation numérique du procédé

➔ Mieux comprendre le procédé

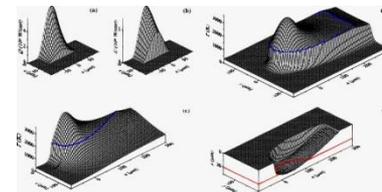
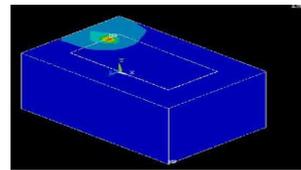
- Fusion de la poudre
- stabilité du bain
- éjection de goutellettes

CrCo <math>15\mu\text{m}</math> , 25000images/s,  
V=166mm/s, P=100W, argon



(Ref. : P. Aubry)

- Simulation thermique

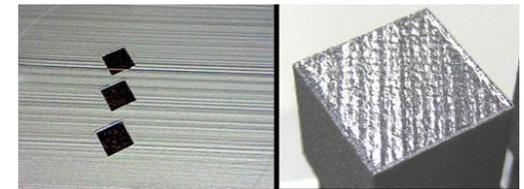
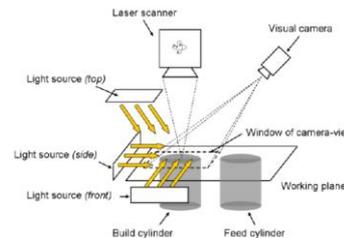


A. Gusarov, I. Smurov, J. Heat Transfer 131, 2009

Vijay & al.S, Indian Jour. of Eng., V1, Num 1, Nov 2012

## Contrôle de procédé

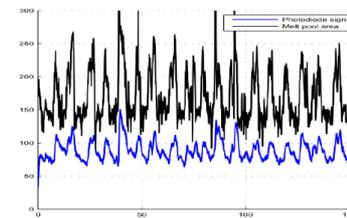
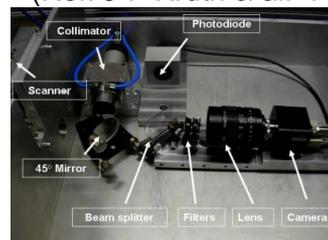
- Contrôle de la mise en couche de la poudre



- Contrôle-commande

➔ Encore peu de travaux (sujet récent), à développer

(Ref. J-P Kruth & al. "Feedback control of Selective Laser Melting")

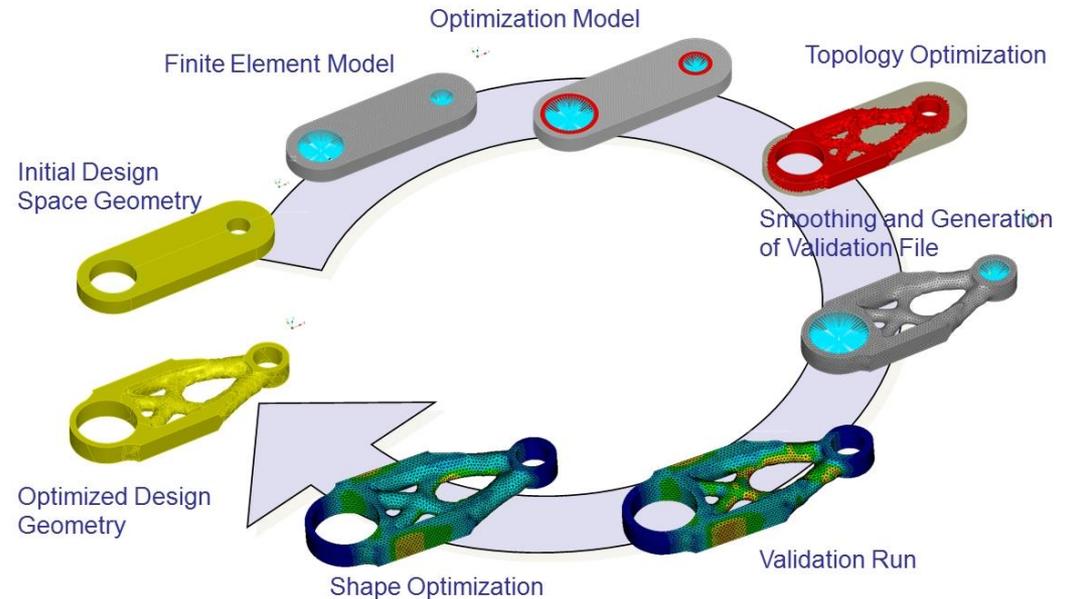


## Complexité géométrique

- Allègement de structure
- Fonctionnalisation
- Analyse topologique
- Texturation 3D/Maillage automatique

Aéronautique

Mécanique



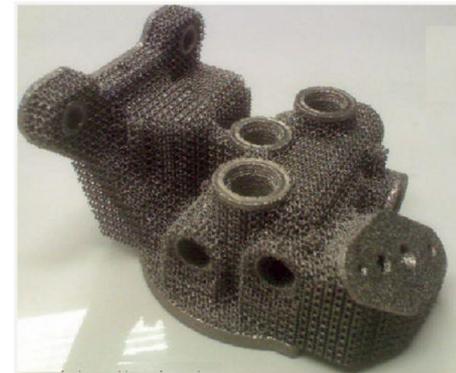
(Ref. SIMULIA Tosca structure, Dassault Systèmes)



(Ref. AIRBUS-EOS)



(Ref. ESA-AMAZE)



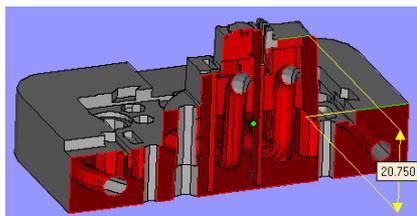
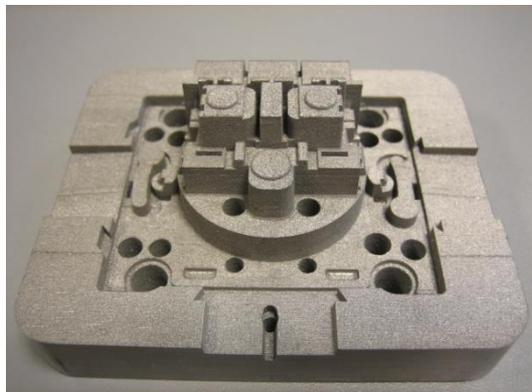
(Ref. N Guo, Front Mech Eng , 2013,,  
Vol. 8 , Issue (3), p 215-243 )



(Ref. ARCAM)

## Complexité géométrique

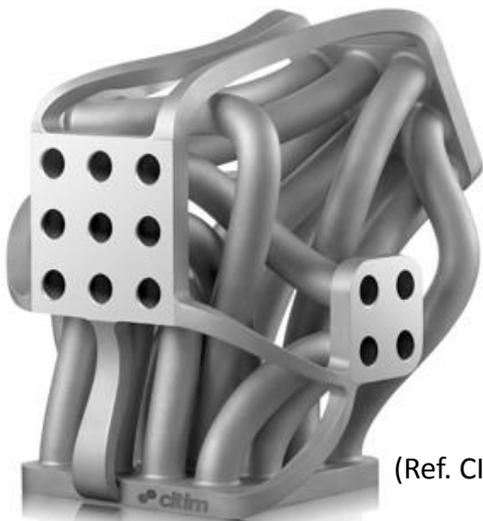
- Intégration des capacités du procédé dans la conception



(Ref.P. Aubry, Projet ANTIOPE)



Heat exchanger (Ref. 3D RPD)



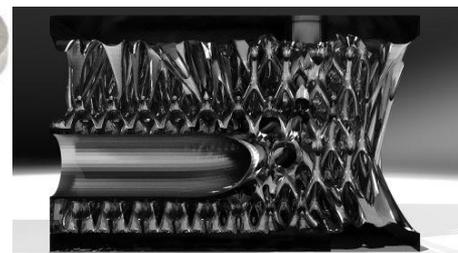
(Ref. CITIM)



(Ref. Witihin Technologies)



(Ref. WJAM2015)



## Complexité géométrique

- Matériaux structurés
- Intégration des capacités du procédé dans la conception



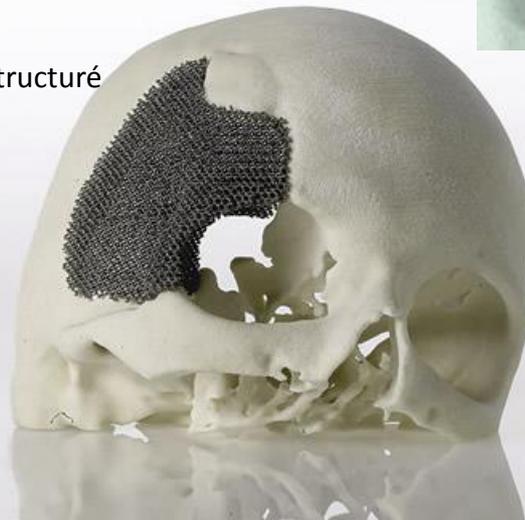
TCP+verre borosilicate par SLM (ref. ILT)



Structure TCP par SLM (Ref. P. Aubry, CEA)



Prothèses Titane structuré  
(Ref. ARCAM)



Prothèses dentaires CoCr (Ref. Phénix Systems)

## Complexité géométrique

- Comment la combinaison de la technologie et des matériaux peut faire rêver ....



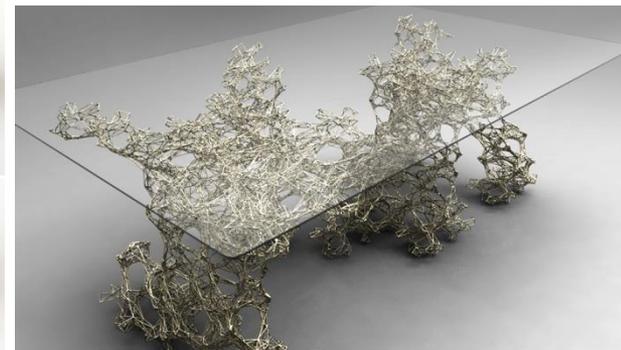
(ref : 3ders.<org> shapeways\*



(ref : ematerialize)



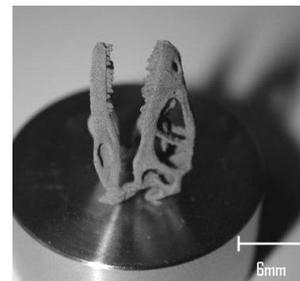
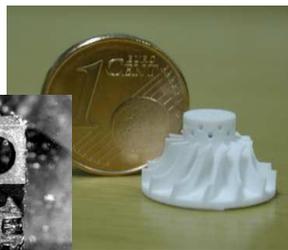
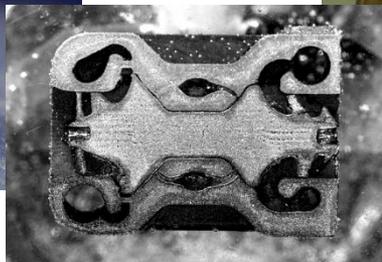
(ref : Materialise's TPU-92A-1, www.core77.com)



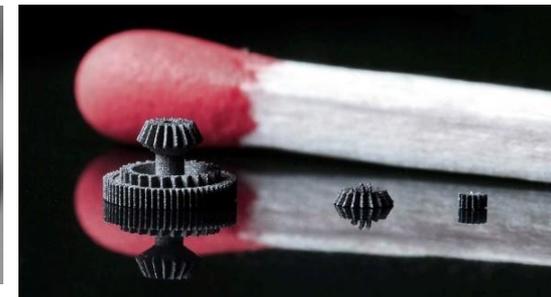
(ref : Daniel Widrig, *Spider*, 2013, Table, titanium and glass)

## Micro-fabrication

- laser pulsé, machine dédiée



(ref : A. Streek, Mittweida Uni.)

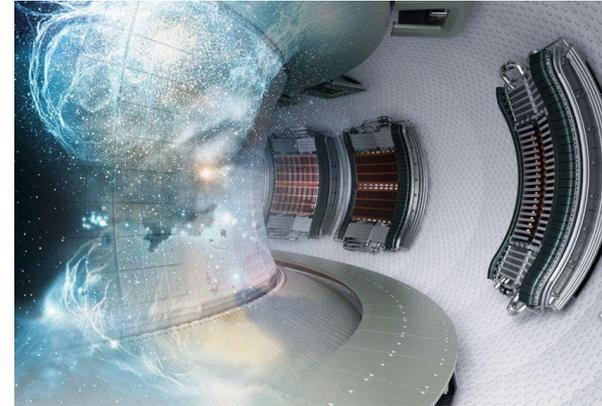


(ref : EOS-3D Micromac)

## Développements : Fabrication pièces 3D

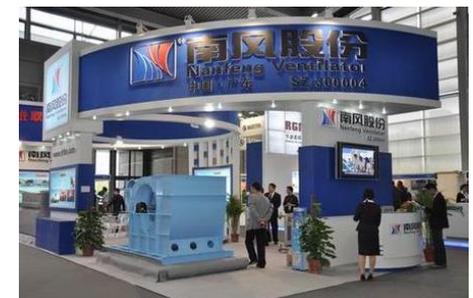
### Application ITER

- Culham Centre for Fusion Energy et Hilde Loken Larsen of Norsk Titanium
- Certains de ses éléments, tel le « divertor » conçu à base tungstène



### Augmentation des dimensions: jusqu'où ira-t-on?

- 3D printer (lit de poudre, cast) : 1,8mx1,8mx1,8m (Dalian University, Nov 2013)
- Nanfang Ventilator Co. Ltd : Annonce Nov 2013 pour début 2014
  - imprimante 3D (procédé?)
  - Zone de fabrication : 28mx23mx9,5m
  - Structures cylindriques
    - Diamètre : <6m
    - Epaisseur : 800mm
    - Longueur : 10m
    - Poids maximum : <300t
  - Acier inox, acier au carbone, aciers faiblement alliés,...
  - Applications : nucléaire, centrale thermiques, construction civile,...



(Ref. [www.3ders.org](http://www.3ders.org))

### A suivre...

## Enjeux de la Fabrication Additive

### • Augmentation des taux de dépôts

- DMD comme SLM
- Augmentation de la taille des composants

### • Quel type de procédé choisir?

- DMD
  - Très grandes dimensions possibles
  - Ebauches
  - Géométries simples
  - Matériaux à gradient
  - Laser, PTAW, faisceau d'électrons

### • SLM

- Grandes dimensions
- Géométries complexes
- Matériaux structurés

### • Aspect métallurgiques

- DMD/SLM pour toutes les sources
  - Prise en compte de l'anisotropie du matériau
  - Prise en compte des déformations



- Simulation des contraintes pour prise en compte
- Traitements Thermiques adaptés
- Optimisation des stratégies de balayage
- ...

### • Aspects dimensionnels/Etats de surface

- SLM : R&D
- DMD : peu problématique, usinage final

DMD source d'énergie	Laser	Faisceau d'électrons	PTAW
Qualité des géométries	+++	+++	++
Qualité métallurgique	+++	+++	++
Coût	++	++	+++
Versatilité	+++	+	++