

# 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

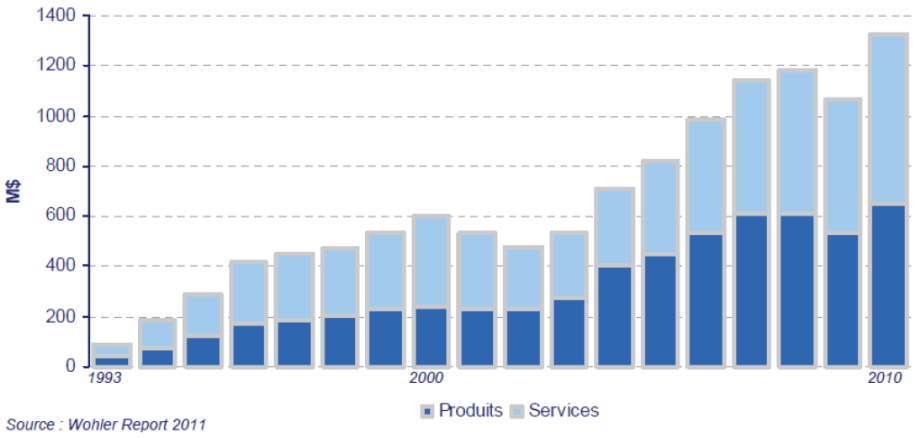
Pascal Aubry DEN//DANS/DPC/SEARS/LISL

18-19 NOVEMBRE 2015

# FABRICATION ADDITIVE – CONTEXTE

## 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

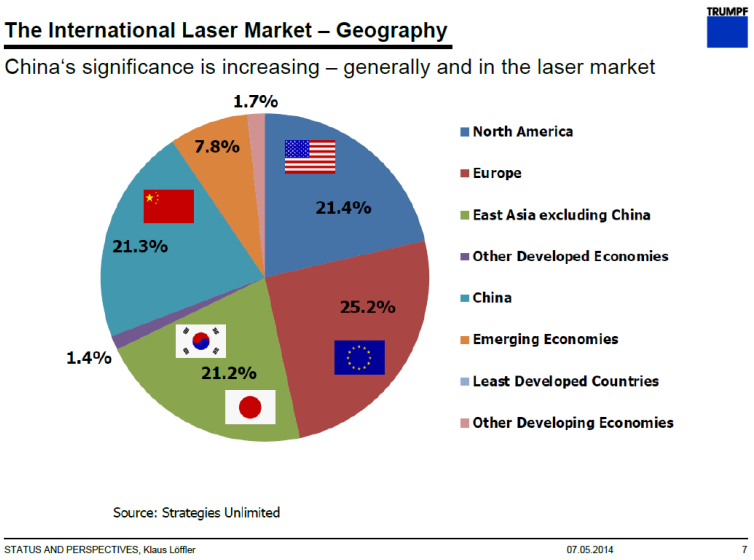


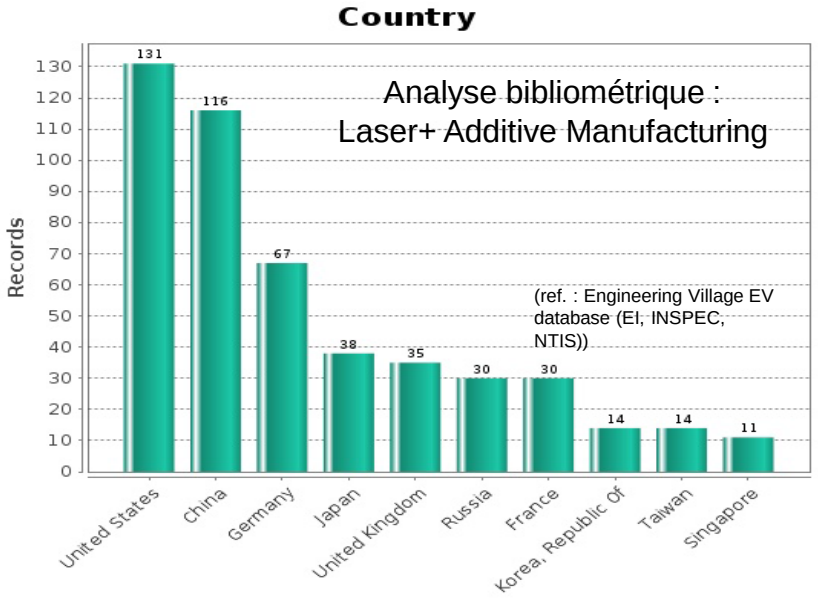

The Economist, April 2012

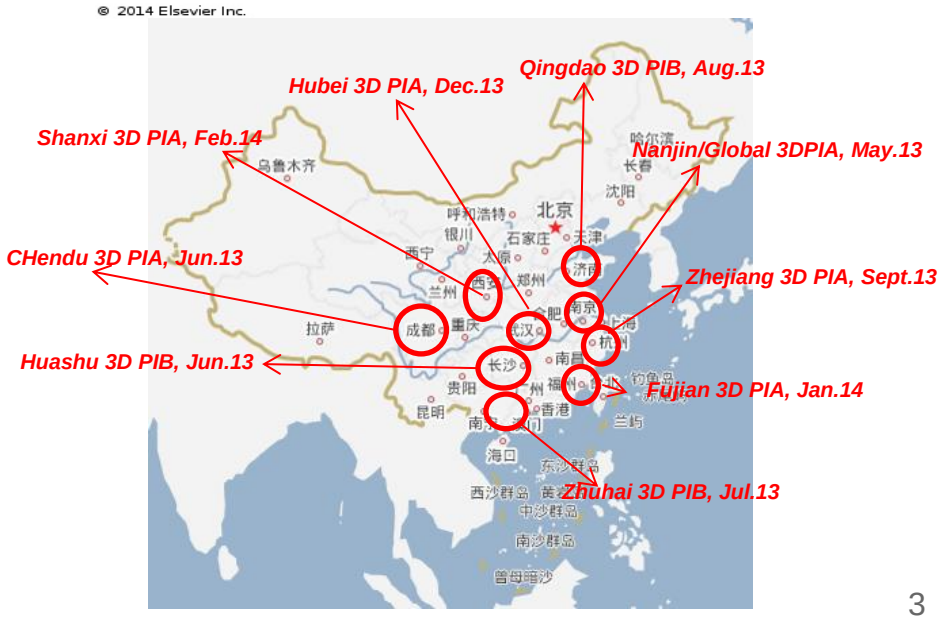
# FABRICATION ADDITIVE - CONTEXTE

## 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



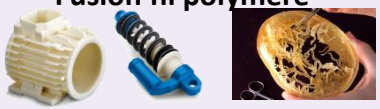

- **USA : Advanced Manufacturing Initiative (2012)**

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

# FABRICATION ADDITIVE - PROCEDES

## Fabrication Additive Métallique/Céramique

**~1985 — Prototypage rapide**
- Stéréolithographie
- SLS Polymère, Jet d'encre
- Fusion fil polymère



**~1990 — Outillage rapide**
- Polymères+charge
- SLS Métal
- Stratoconception



**~1995-2000 — Fabrication directe**
- Fabrication Additive
  - DMD,SLM,EBM,…
- Stratoconception Métal
- UGV

**Fabrication Additive**

- **Lit de poudre**
  - **Laser**
    - Realizer
    - Concept Laser
    - SLM Solutions
    - EOS
    - 3D System
    - Renishaw
  - **Faisceau Electrons**
    - ARCAM
- **Projection poudre**
  - **PTA,PTAW**
  - **Laser**
    - Trumpf
    - BEAM
    - EFESTO
    - OPTOMEC
- **Fil**
  - **Laser**
  - **Faisceau Electrons**
    - SCIAKY
  - **PTAW, TIG…**
    - Titanium Norsk Corp.

# FABRICATION ADDITIVE : PROCEDES DE FUSION

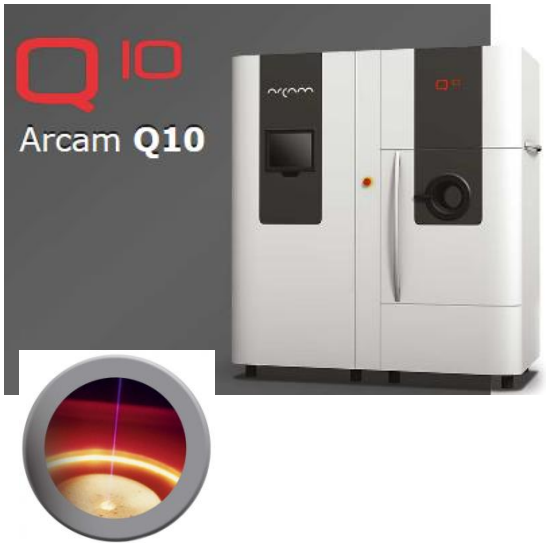
## Fabrication additive par faisceau d'électrons

### 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'$O_2$)

Intérêt sur les alliages de titane




*(Ref. http://www.arcam.com/)*



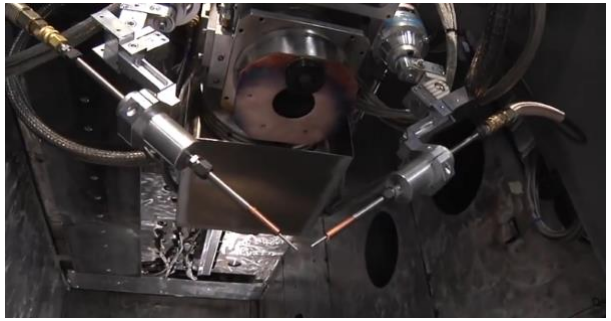
Implant crânien

### ② Fusion de fil par FE

Machine « Sciaky »

- Sous vide
- 100% matière fusionnée
- Grandes dimensions

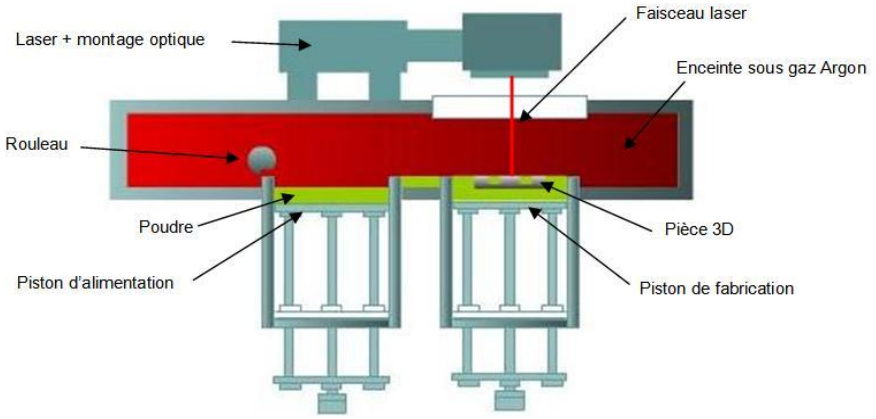




# FABRICATION ADDITIVE : PROCEDES DE FUSION

## Fabrication additive par laser

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




**Métaux (SLM) & Polymères (SLS)**

Avantage : géométries plus complexes

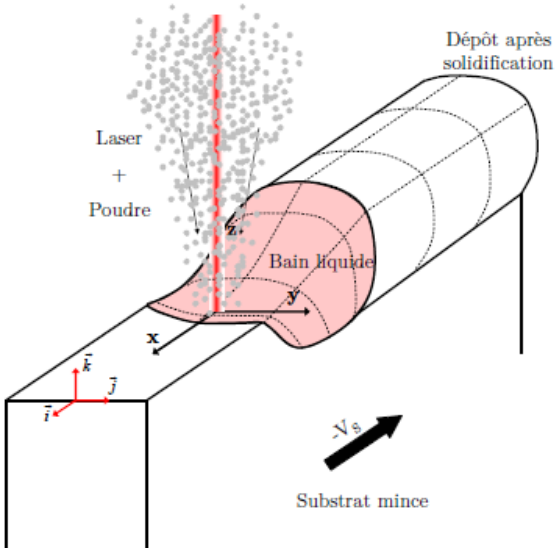
Parois > 0,1 mm, hauteur des couches > 25 µm

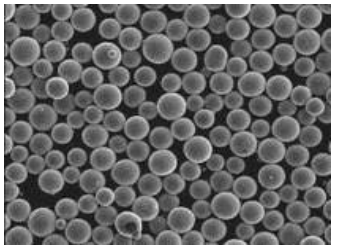






### ② Fusion de Poudre projetée (DMD) / Fil







**Métaux** : Ti, Al, Fe, Ni

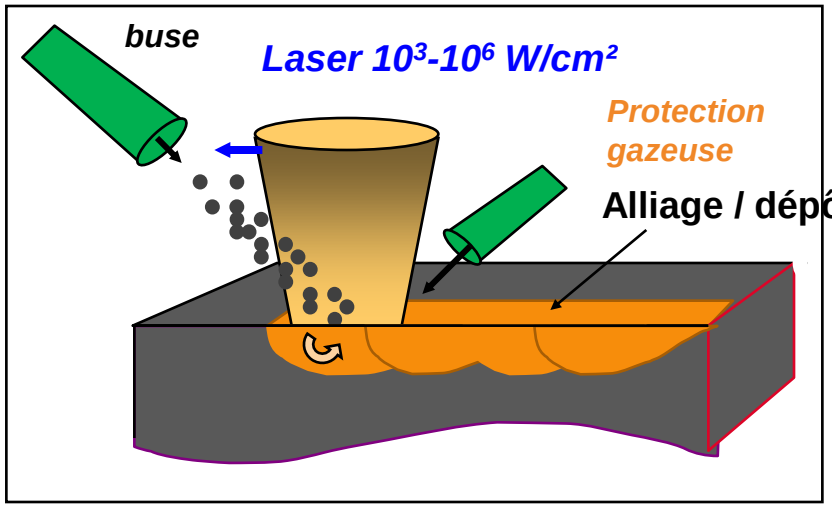
Avantages : Rapidité, matériaux à gradients

Parois > 0,5 mm, Δh > 0,2 mm

# PROJECTION LASER

## Principe

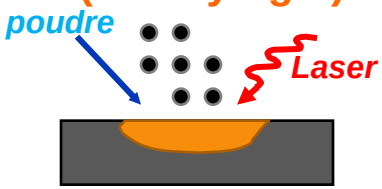
Laser Cladding, Direct Metal Deposition, Laser Metal Deposition,
Directed Energy Metal Deposition







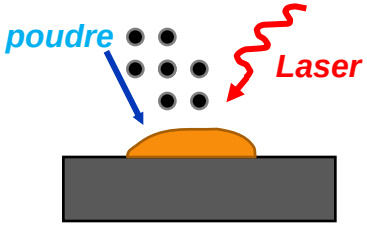

**Alliages de surface**
**(« Alloying »)**




***Refusion Substrat + poudre***
***Bonne dilution***
***Propriétés d 'un alliage***

***Dilution = 10 %***

**Revêtements**




***Fusion de la poudre avant le substrat***
***Dilution réduite***
***Propriétés d 'un dépôt adhérent***

**Réparation/Fabrication directe**

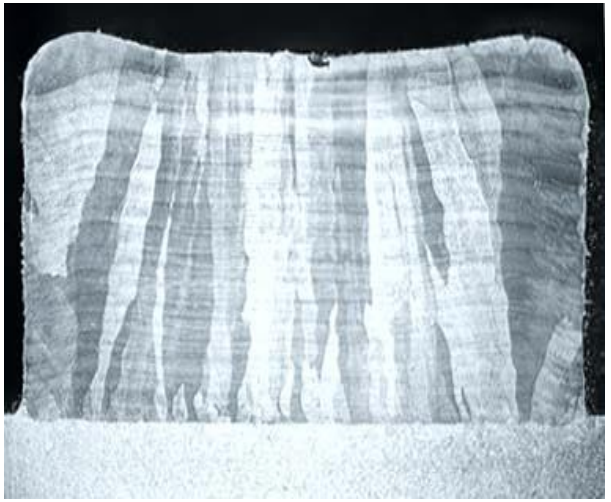
# PROJECTION LASER

## 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 | | 304, 316, 420,904L |
| | Hastelloy X | **Aluminum** | 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 | **Cuivre** | GRCop-84 |
| | Rene 142 & N5 | | 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**



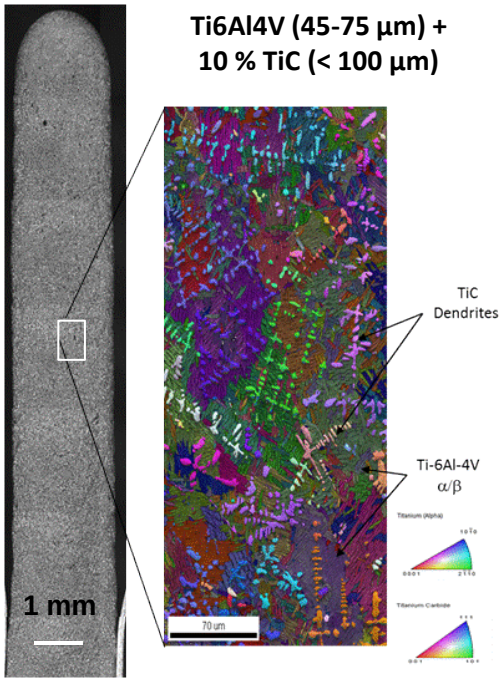
Projection laser échantillon TA6V
(Ref. P. Aubry, ANR PROFIL)

# PROJECTION LASER

## Développement matériaux

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

### Elaboration de Composites à matrice Titane




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

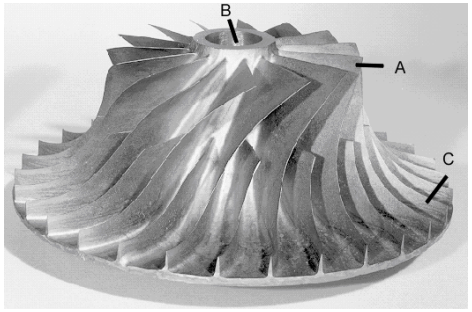
### Transition à gradient de composition

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

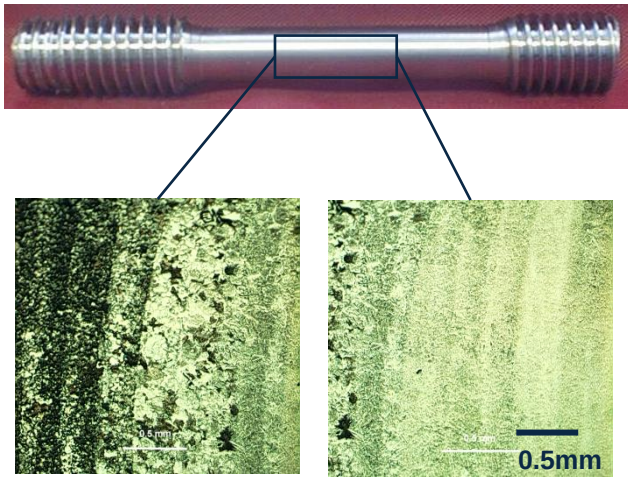



(Ref. PIMM, AMPT, P. Peyre, P. Aubry)

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




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

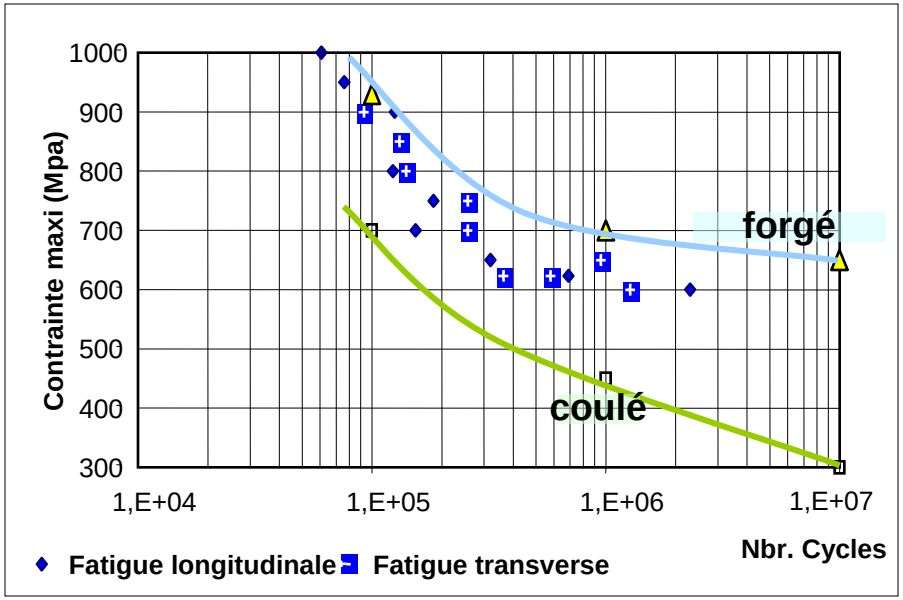



(Ref. OPTOMEC)

# PROJECTION LASER

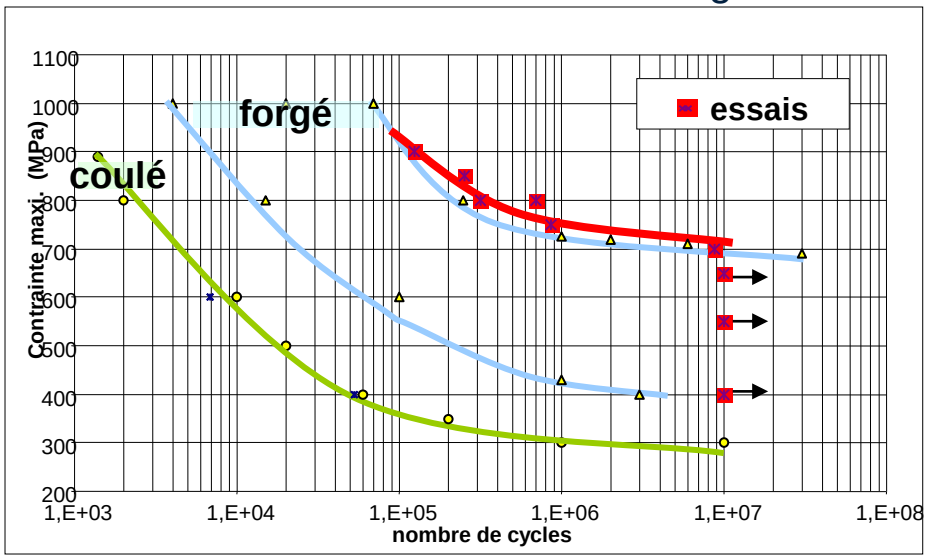
## Comportement mécanique des matériaux

Essai fatigue Inconel 718




(Ref. LENS OPTOMEC)

Essai fatigue TA6V

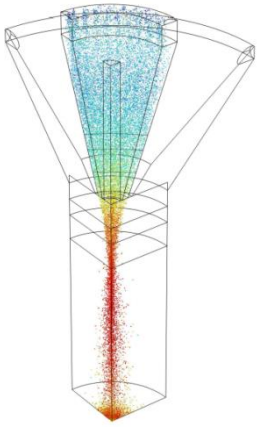



(Ref. P. Aubry, ANR PROFI)

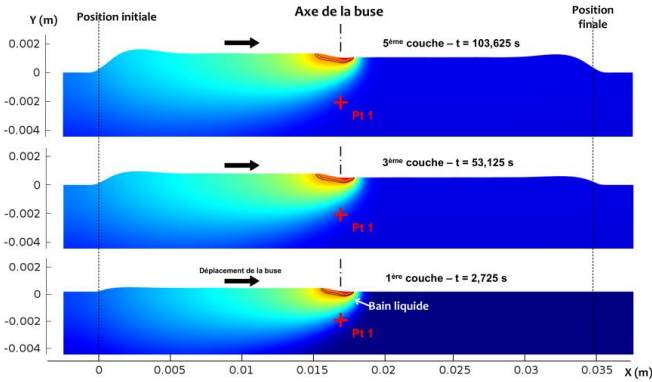
| Materiau | Limite élastique (MPa) | Résistance à la traction (MPa) | Al. (%) |
|---|---|---|---|
| Ti 6-4 DMD | 848 | 955 | 15 |
| Ti 6-4 forgé typ. | 883 | 952 | 14 |
| 316L DMD | 276 | 661 | 67 |
| 316L forgé typ. | 289 | 578 | 50 |
| Inco 625 DMD | 579 | 930 | 38 |
| Inco 625 forgé typ. | 400 |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

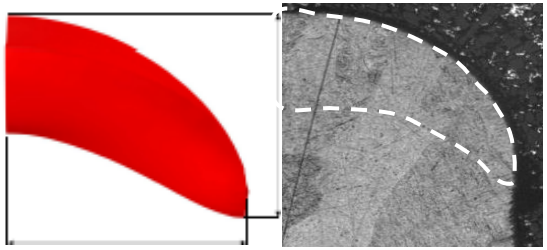
# PROJECTION LASER

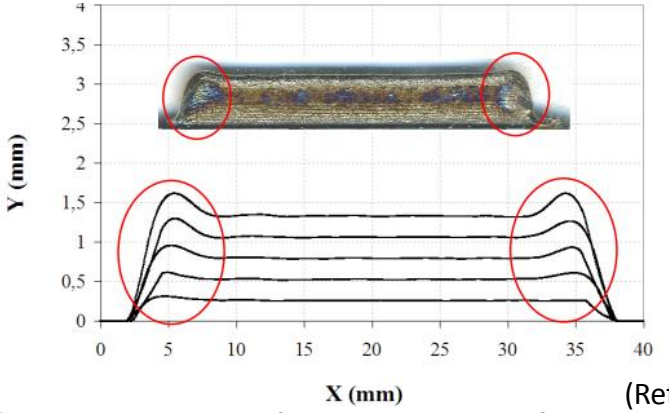
## Modélisation/Simulation numérique du procédé



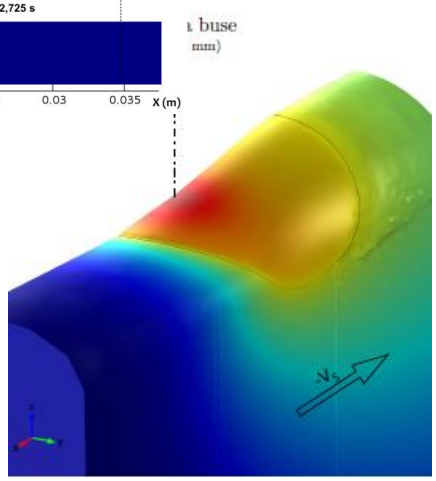
Simulation jet de poudre



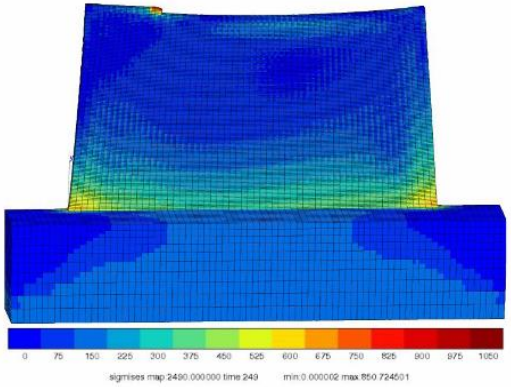



Modèle 2D (20 couches = 6 h)



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)

LIMATB

COMSOL

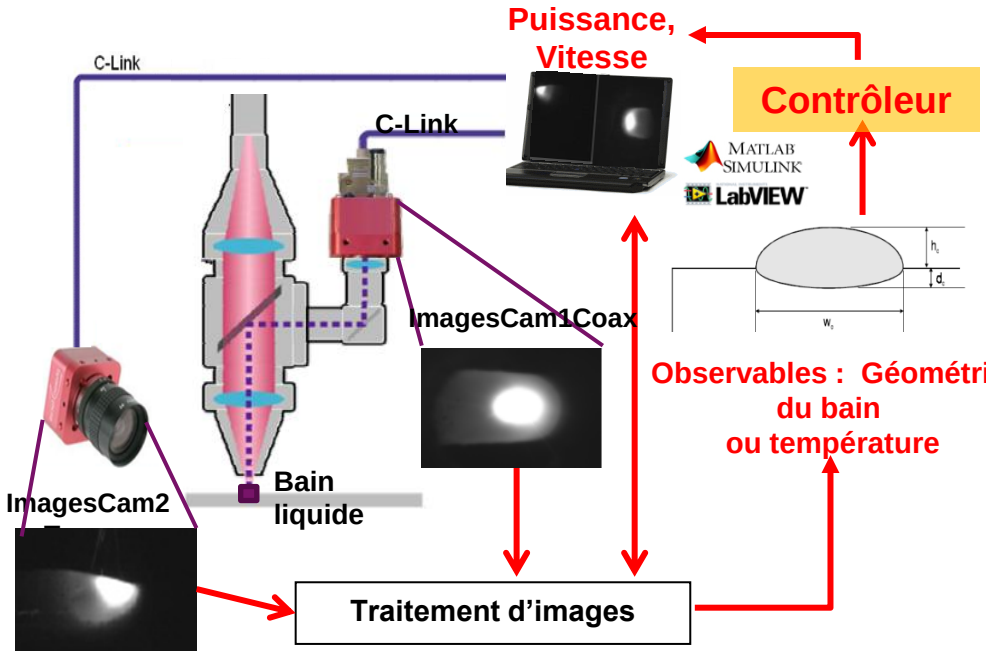
(Ref. ANR ASPECT, coll. LIMATB, thèse S. Morville, 2012)

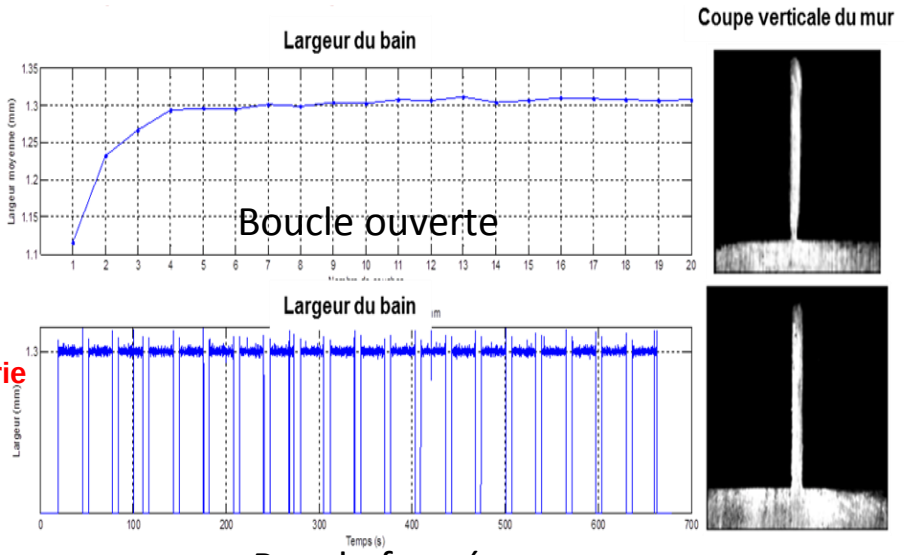
# PROJECTION LASER

## 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…




Boucle fermée

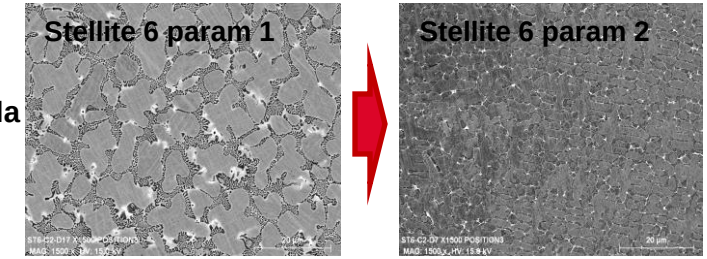
(Ref. P. Aubry , thèse R. Mezari, FUI FALAFEL , Fabrication Additive par LAser et Faisceau d'ELectrons)

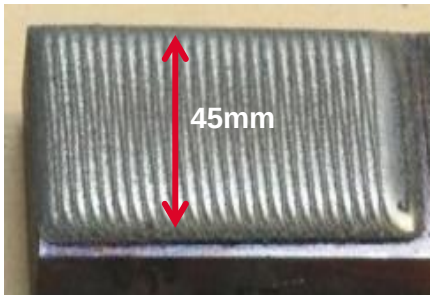
# PROJECTION LASER

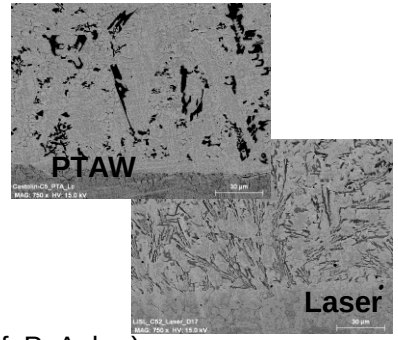
## Revêtement/Réparation

### • Revêtement durs substituts de stellite

**Contrôle et affinement de la microstructure**

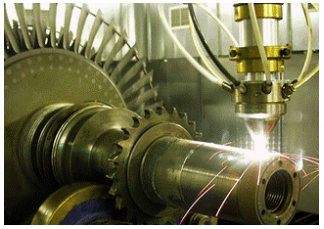



**COLMONOY 52 (LC)** (Ref. P. Aubry)

### • Réparation de composants mécaniques



(Ref. GE Oil& Gas)



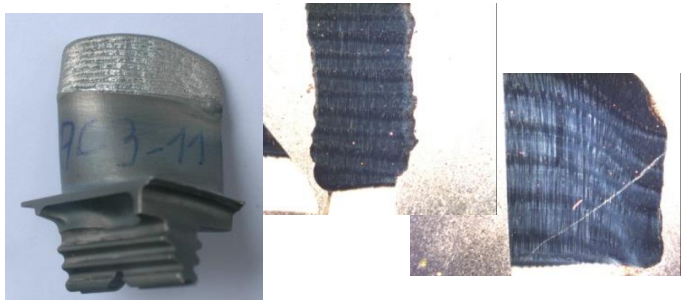
(Ref. Hayden Corp.)



(Ref. Dalu Corp..)

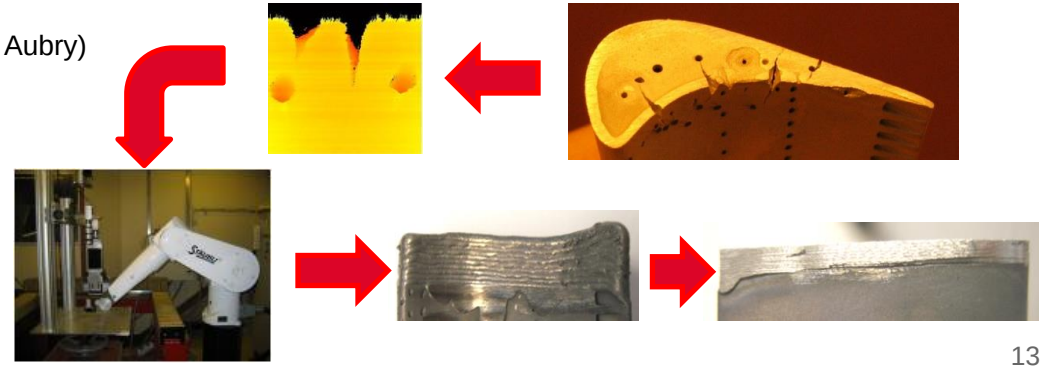
### • Réparation de composants aéronautiques

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



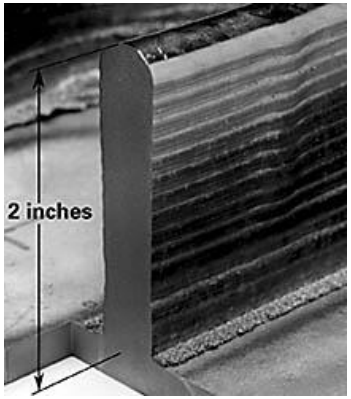
(Ref.P. Aubry)

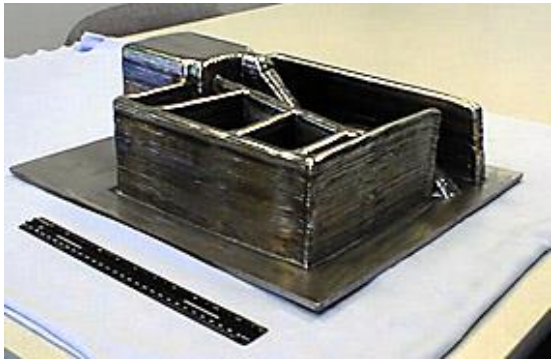
**Réparation automatisées de sommet d'aubes Numérisation, génération automatique**

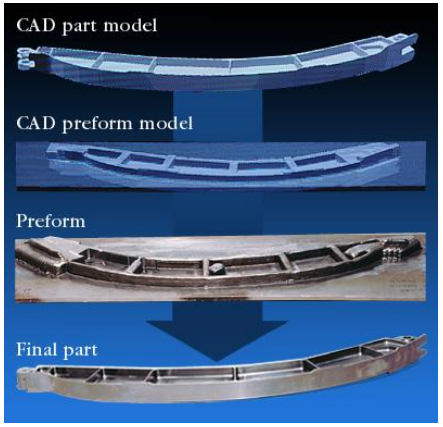


# PROJECTION LASER

## Développements: Fabrication pièces de grandes dimensions

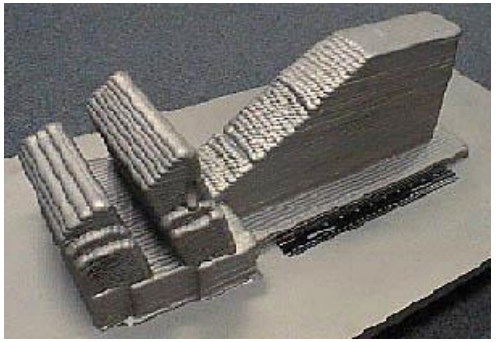


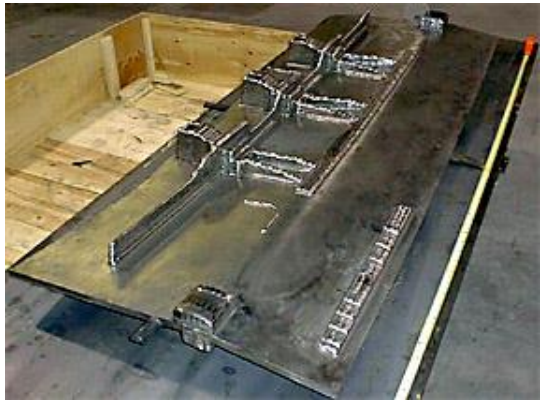






**Société AeroMet, MTS sub. (WA, USA) ~1997-2004**

- Laser $CO_2$ 14-30 kW
- Enceinte de protection gazeuse
- Pièce ~2mx1mx1m
- TA6V, 5-6 kg/h, $V_{dépôt}/V_{global}$=1/6-1/7









# PROJECTION LASER

## Développements : Géométrie et pièces de grandes dimensions

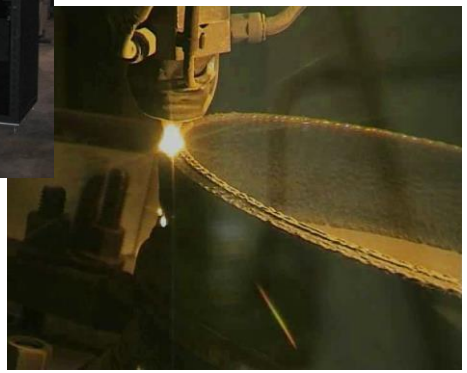
- **Projet ANR PROFIL (GIP GERAILP : CEA,CNRS,DGA...)**



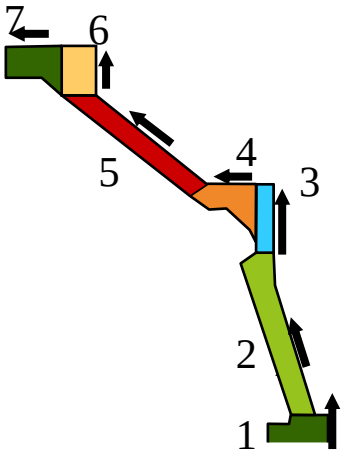
- **Pièces aéronautiques**
- **TA6V/Inco718**
- **2D/3D**
- **Evaluation des capacités de la projection laser**




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



### Carter en Inco718








(Ref. P. Aubry)

# PROJECTION LASER

## Développements : Fabrication pièces de grandes dimensions



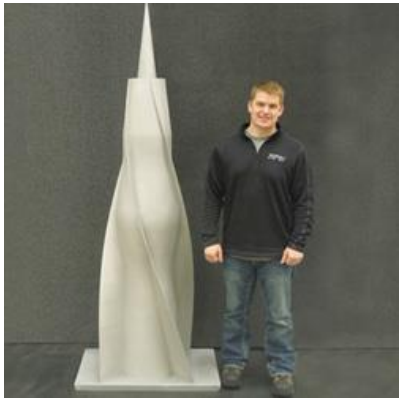
Cadre supports pour fighter-4 J-20 or J-31 stealth fighter Y-20 Strategic Airlifter, J-15 carrier-borne fighter, C919 airliner



(Ref. Biehang Univ.)



(Ref. Northwestern Polytechnical Univ.)



(Ref. EFESTO) pièce TA6V

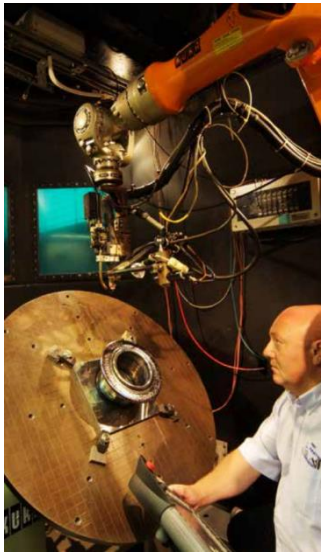
EFESTO
A Metalworking Revolution

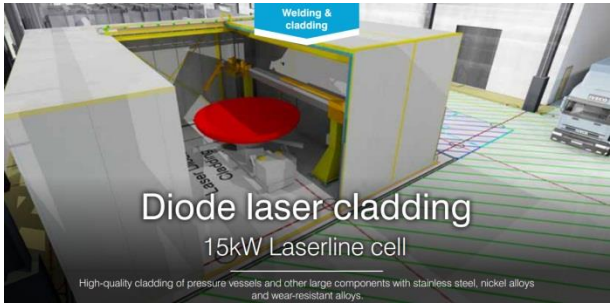
- Installation TIG
  - Fabrication/ajout structures creuses,
  - Robot Kuka + 2 axes
  - TIG fil froid
  - Table :~1.6m2

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

The University Of Sheffield.





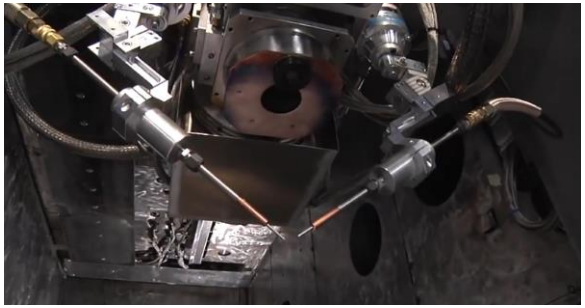

(Ref. Nuclear AMRC)

# FAISCEAU D'ELECTRONS

## Machine société Sciaky

- **Fusion de fil par faisceau d'électron**
- **Enceinte ~5,8mx1,2mx1,2m**

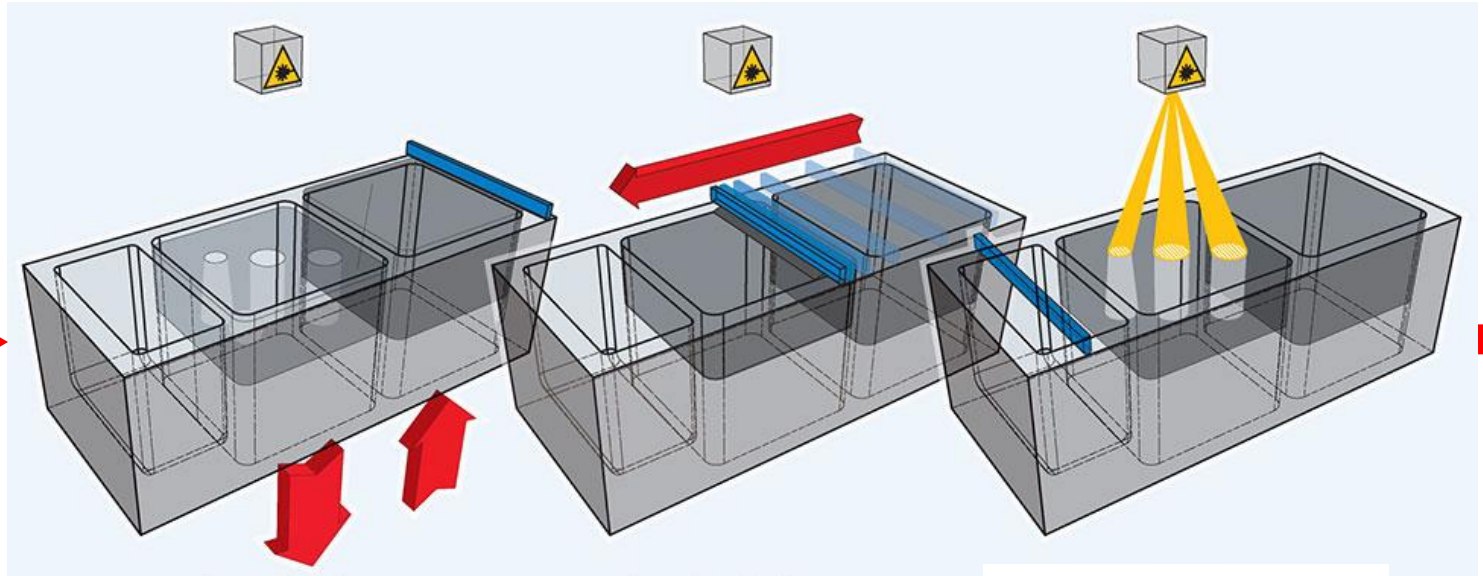






# FUSION LIT DE POUDRE (SLM)

## 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,...

# FUSION LIT DE POUDRE (SLM)

## Développements matériaux

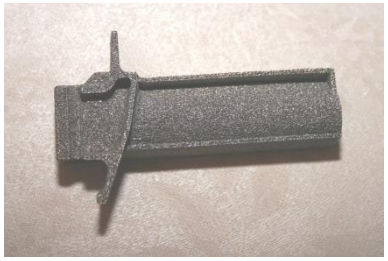
- **Fe alloys: 904L, 316L, 1.2343, 17-4PH, 100C6**
- **Ti alloys: TA6V**
- **Ni alloys: Inco718,C263**
- **CrCo : Stellite12, Stellite 6**
- **Céramiques : Alumine, Zircone,SiC,...**

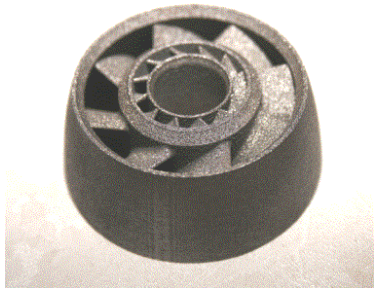




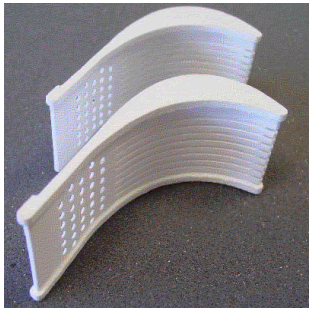

**Machine PM250 Phenix Systems**

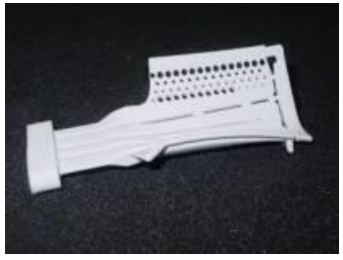
**Arts et Métiers ParisTech**



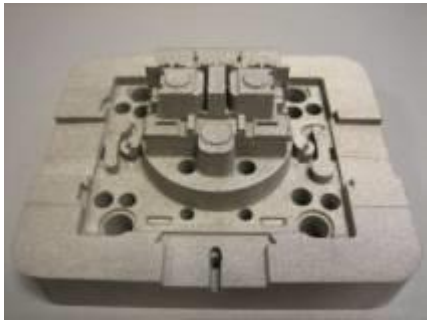


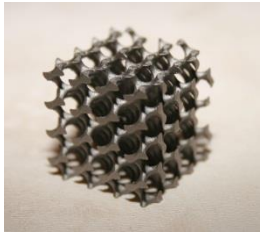
(Ref.P. Aubry)















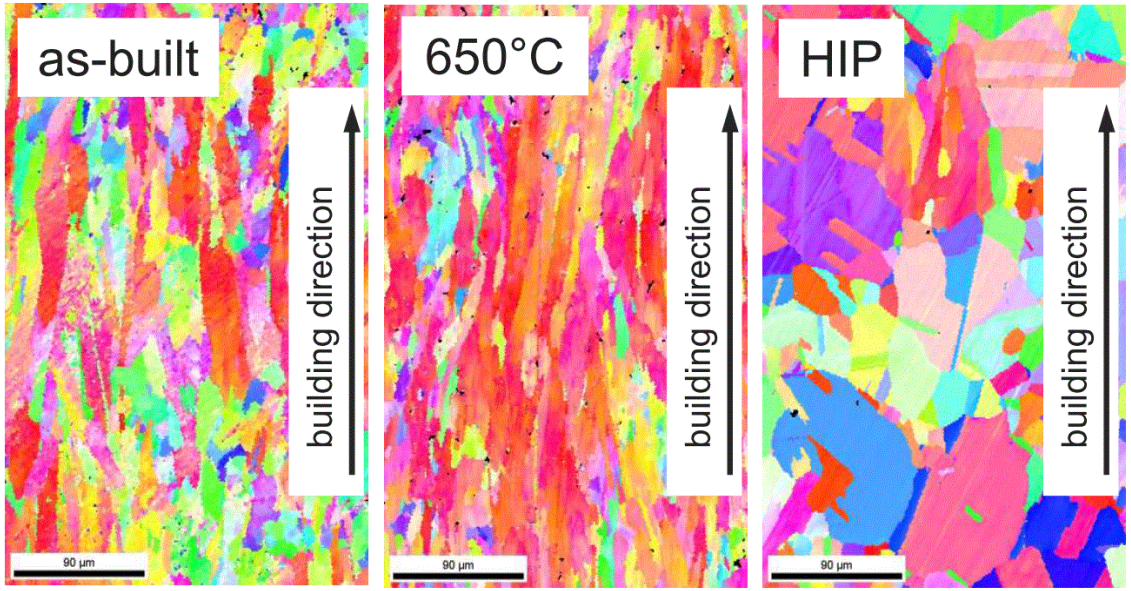
# FUSION LIT DE POUDRE (SLM)

## Comportement mécanique des matériaux

### Exemple 316L



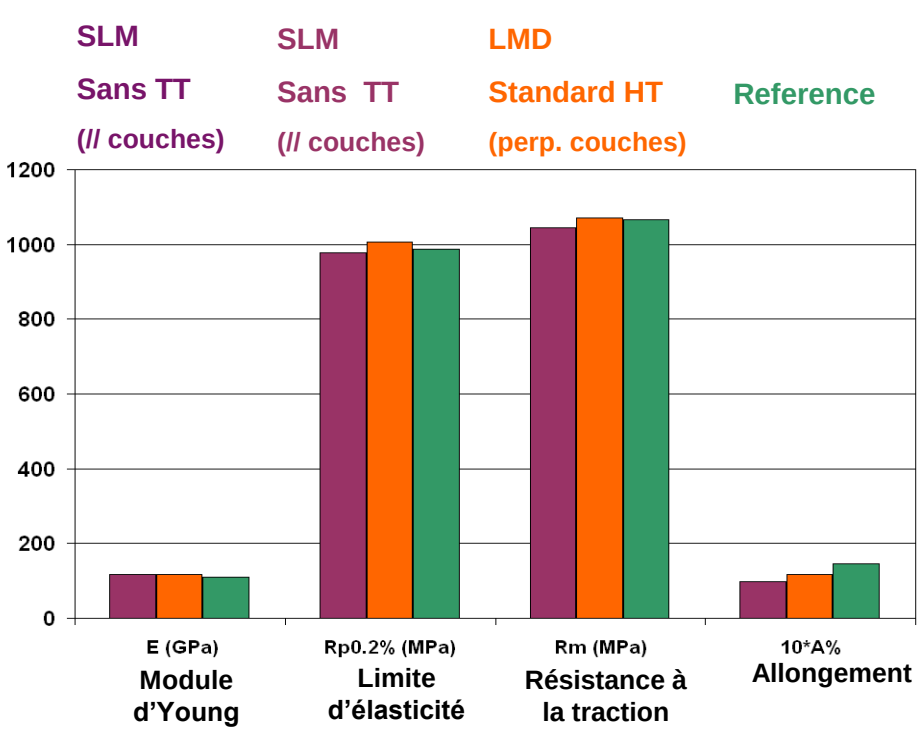
| condition | UTS/MPa | YS/MPa | Elong % |
|---|---|---|---|
| Brut de SLM | 565+/-5 | 462+/-5 | 53.7+/-3 |
| 650°C | 595+/-5 | 443+/-5 | 48.6+/-3 |
| Reference | 530-680 | 220 | 40 |



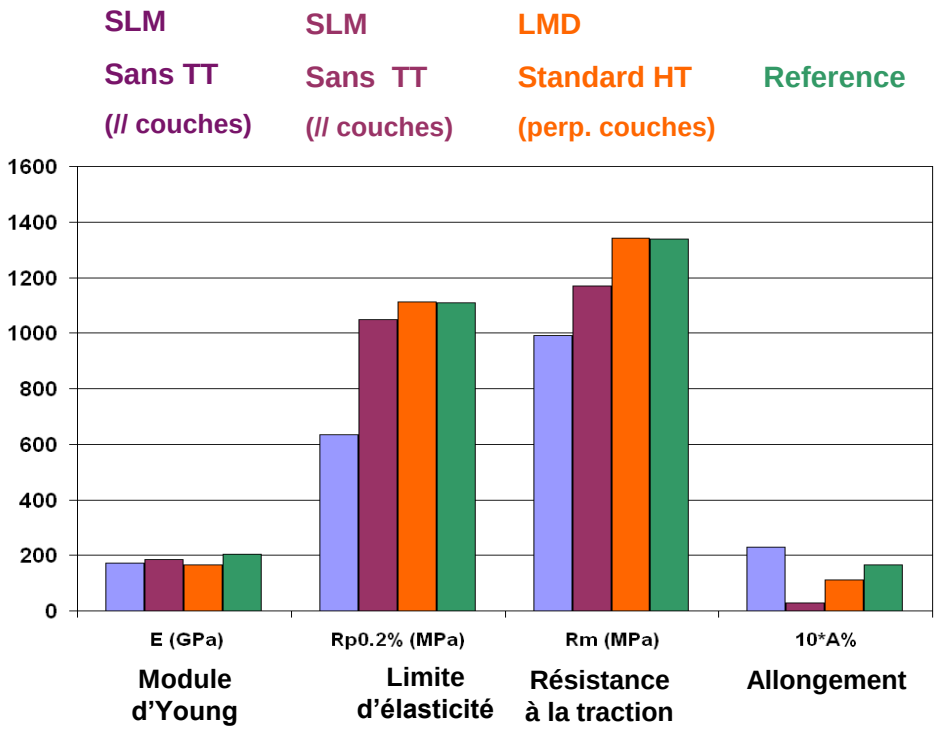

(ref. T. Niendorf & al., « On the fatigue performance of materials processed by SLM: bulk material and lattice strutures », Fatigue 2014)

# FUSION LIT DE POUDRE (SLM)

## Comportement mécanique des matériaux




**TA6V4**




**Inco718**

(Ref. P.Aubry, Projet ANR PROFIL)

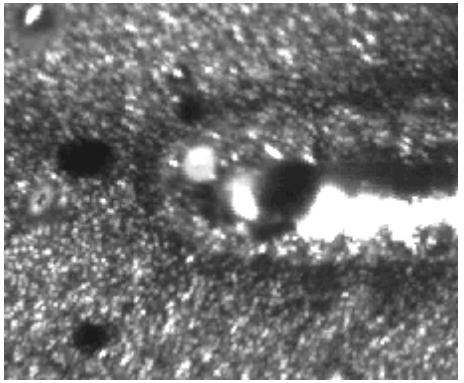
# FUSION LIT DE POUDRE (SLM)

## Modélisation/Simulation numérique du procédé

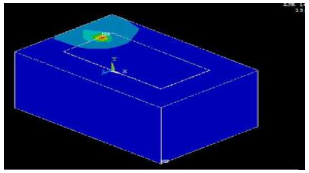
Mieux comprendre le procédé
- Fusion de la poudre
- stabilité du bain
- éjection de goutellettes

**CrCo <15µm , 25000images/s, V=166mm/s, P=100W, argon**

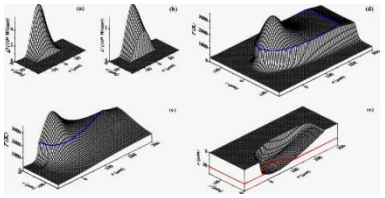
(Ref. : P. Aubry)



- Simulation thermique



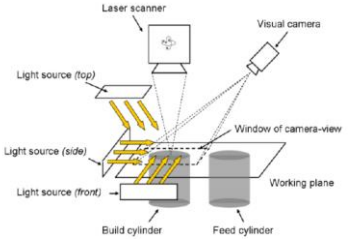
Vijay & al.S, Indian Jour. of Eng., V1, Num 1, Nov 2012

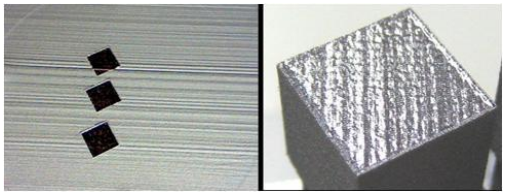


A. Gusarov, I. Smurov, J. Heat Transfer 131, 2009

## Contrôle de procédé

- Contrôle de la mise en couche de la poudre

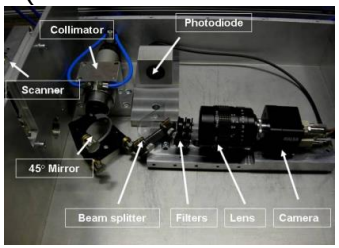


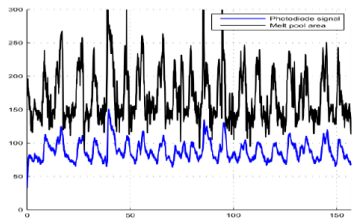



(Ref. J-P Kruth & al. "Feedback control of Selective Laser Melting")

- Contrôle-commande

Encore peu de travaux (sujet récent), à développer



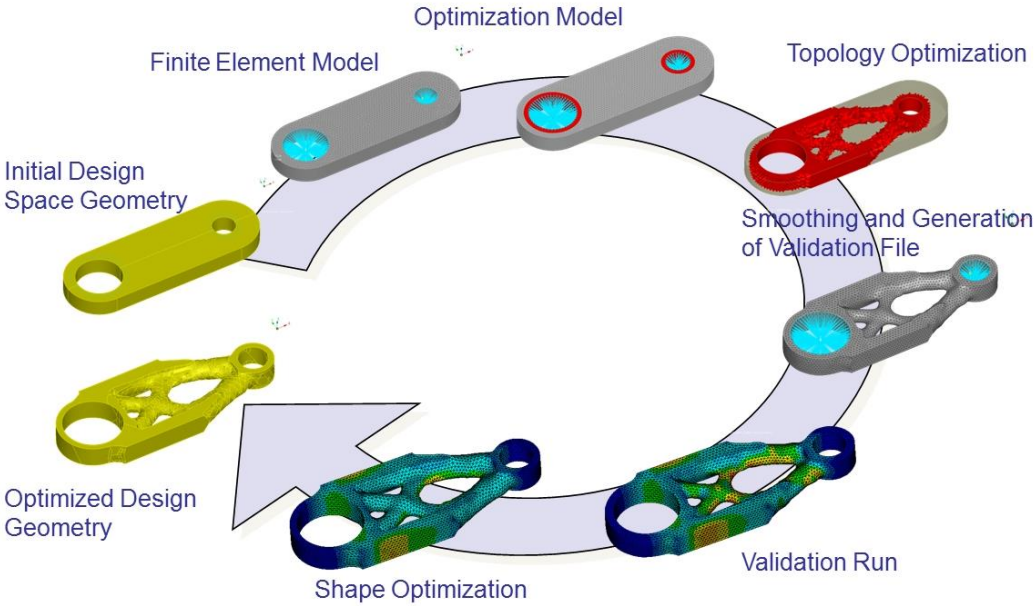



# FUSION LIT DE POUDRE (SLM)

## Complexité géométrique

- Allègement de structure
- Fonctionnalisation

- Analyse topologique
- Texturation 3D/Maillage automatique




(Ref. SIMULIA Tosca structure, Dassault Systèmes)

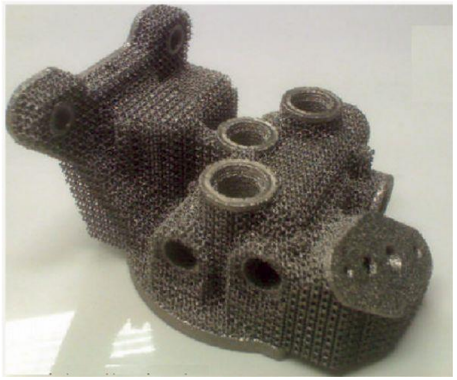
Aéronautique Mécanique



(Ref. AIRBUS-EOS)



(Ref. ESA-AMAZE)



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

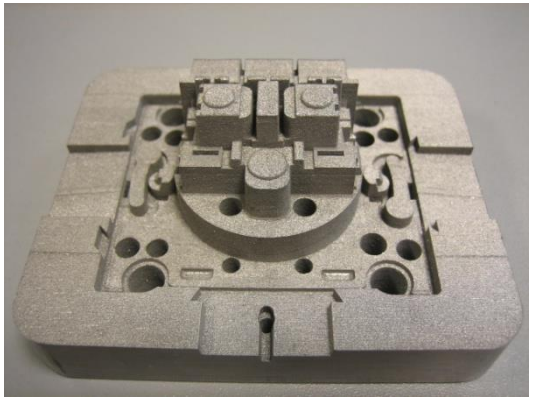


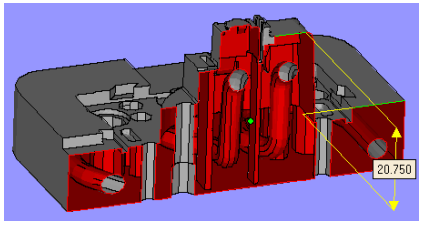
(Ref. ARCAM)

# FUSION LIT DE POUDRE (SLM)

## Complexité géométrique

- **Intégration des capacités du procédé dans la conception**

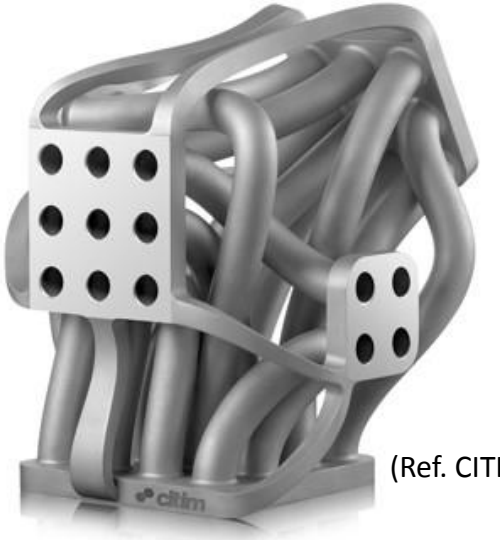





(Ref.P. Aubry, Projet ANTIOPE)



Heat exchanger (Ref. 3D RPD)



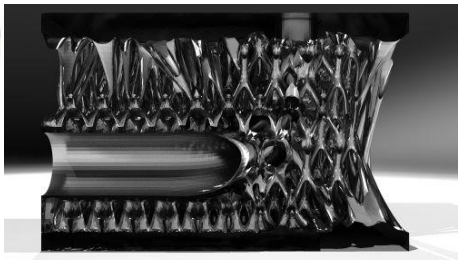

(Ref. CITIM)



(Ref. Witihin Technologies)



(Ref. WJAM2015)



# FUSION LIT DE POUDRE (SLM)

## Complexité géométrique

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




TCP+verre borosilicate par SLM (ref. ILT)



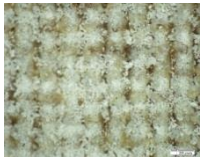




Structure TCP par SLM (Ref. P. Aubry, CEA)

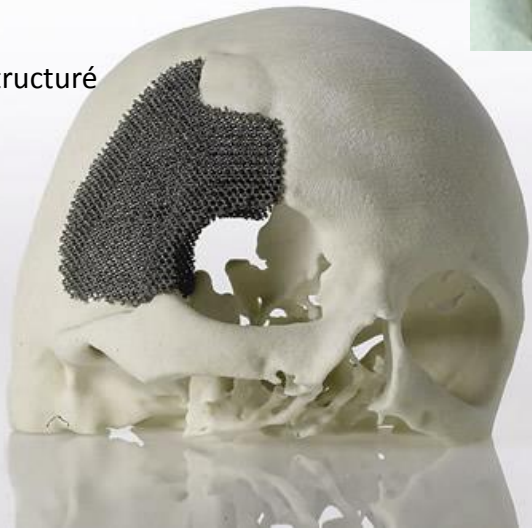






Prothèses Titane structuré
(Ref. ARCAM)







Prothèses dentaires CoCr (Ref. Phénix Systems)

# FUSION LIT DE POUDRE (SLM)

## Complexité géométrique

- **Comment la combinaison de la technologie et des matériaux peut faire réver ….**



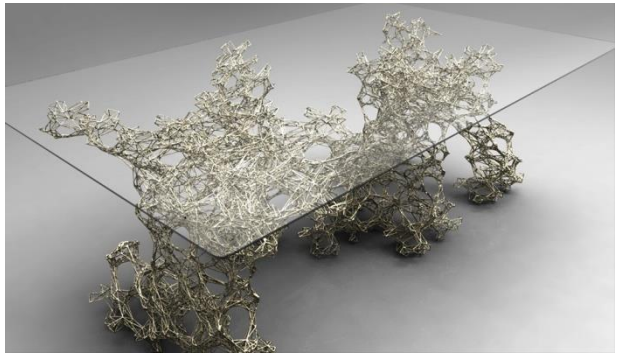

(ref : 3ders.<org)



(ref : ematerialize)



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

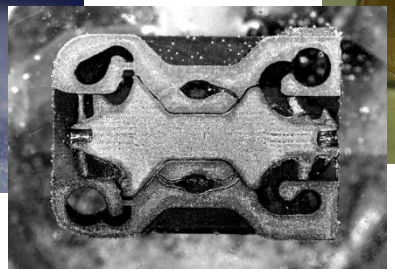


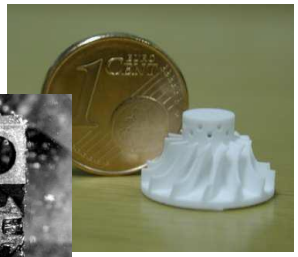
(ref : Daniel Widrig, *Spider*, 2013, Table, titanium and glass)

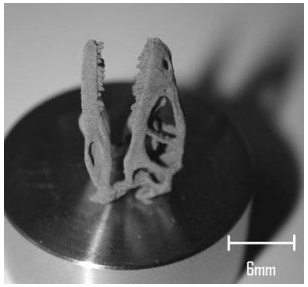
## Micro-fabrication

- **laser pulsé, machine dédiée**

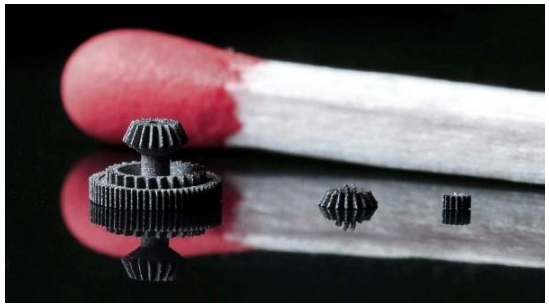








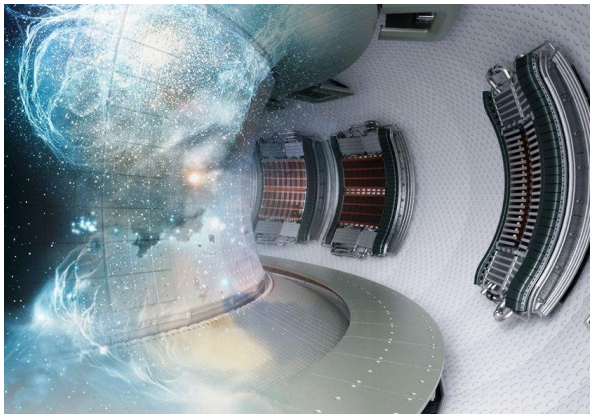

(ref : A. Streek, Mittweida Uni.)



(ref : EOS-3D Micromac)

# PERSPECTIVES

## Développements : Fabrication pièces 3D

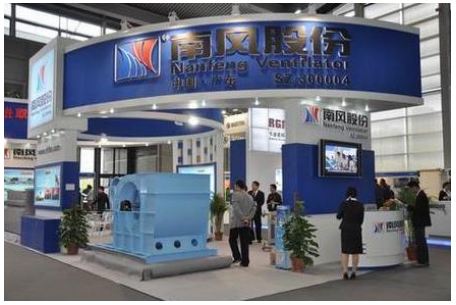


### Application ITER

- 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 cylindiriques
    - 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)

### A suivre…

# PERSPECTIVES/CONCLUSIONS

## Enjeux de la Fabrication Additive

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

- **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 problèmatique, usinage final**