



## Prospective sur la **fabrication additive** pour les laboratoires de l'IN2P3



### 10 laboratoires :

LPC, LPSC, LAPP, CPPM, SUBATECH, IPHC, LPNHE, LLR, IPNO, LAL

### 4 spécialités :

Fabrication mécanique, bureau d'études, technologie du vide, calcul de structure

### 17 agents :

J. Bonis, H. Carduner, AM. Cauchois, G. Deleglise, H. Franck De Preamont, J. Giraud, A. Gonnin, E. Guerard, S. Jenzer, M. Krauth, J. Laurence, B. Mercier, F. Peltier, Ph. Repain, S. Roni, M. Roy, L. Vatrinet



## Introduction

**Objectifs du projet 3D Métal**

**Les procédés de FA métal**

**Les partenaires**

**Essais de traction - Analyses de surface - Tenue au vide**

**Pièces réalisées en FA**

**Conclusion**

# Historique

**1952** **Kojima** démontre les avantages de la fabrication par couches superposées.

**1984** **Premier brevet** déposé par le Français **Jean Claude André**, suivi par l'Américain **Chuck Hull** un mois plus tard.

**1990** **Prototypage Rapide.** Réalisation de maquettes.

**1995** **Outillage Rapide.** La fabrication additive est utilisée pour la réalisation de moules et pour produire des pièces de préséries.

**2000** **Fabrication Rapide.** La fabrication additive est utilisée pour des pièces de production en petites et moyennes séries.

Créée à l'origine pour le prototypage rapide, l'impression 3D sert de plus en plus à la **réalisation de produit finis**.

# Préambule

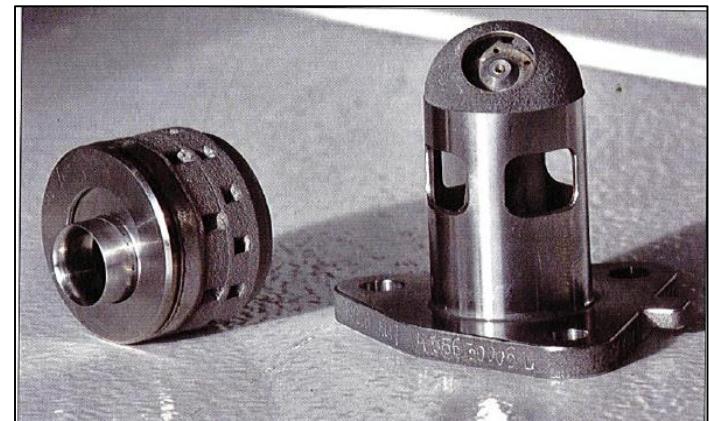
**Impression 3D** est un terme de marketing inventé pour remplacer le nom de **stéréo-lithographie**.

Dans le milieu professionnel on utilise principalement le terme de **fabrication additive (FA)**.



AIRBUS - Connecteur de l'A350  
Poids réduit de 30%

- Géométries complexes et imbriquées
- Pièces creuses
- Capteurs et électronique intégrés aux polymères
- Pièces multi-matières
- Allègement de structures
- Canaux de régulation thermique
- Passage de fluides



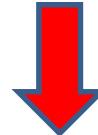
TURBOMECA – Injecteur de carburant  
1 seule pièce au lieu de 12  
40 000 par an

**La fabrication additive** regroupe plus d'une **trentaine de technologies différentes**

7 familles de base classifient les procédés de fabrication additive (**NF E 67-001** et **NF ISO17296-2**)

# Principe de la fabrication additive

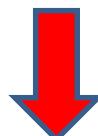
Conception numérique ou rétro conception en 3D de l'objet  
CAO, scanner 3D



Conversion et préparation en fichier numérique pour la fabrication



Fabrication de l'objet par empilement de couches



Finitions

Nettoyage, enlèvement du support, reprise d'usinage, traitements thermiques, chimiques....



## Introduction

# Objectifs du projet 3D Métal

**Les procédés de FA métal**

**Les partenaires**

**Essais de traction - Analyses de surface - Tenue au vide**

**Pièces réalisées en FA**

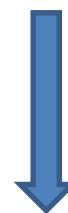
**Conclusion**

# Objectifs du projet 3D Métal

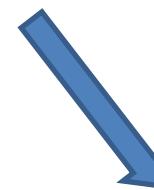
Démontrer **l'utilité de la fabrication additive métal pour nos laboratoires**



à nos **bureaux  
d'études**



aux **demandeurs  
principaux :**  
**les physiciens**



à nos **ateliers de  
fabrication**

# Valeurs ajoutées de la FA pour nos thématiques

## DéTECTEURS pour la physique des particules :

- structures de faible densité
- matériaux à bas bruit de fond (physique du neutrino)

## TECHNOLOGIE des accélérateurs :

- diminution du nombre de pièces d'ensemble complexe
- canaux de régulation thermique intégrés
- technologie du vide
  - électrons secondaires
  - diminution du nombre de brasures et de soudures

## Astrophysique :

- optimisation des masses

## Autres...

# Projet 3D Métal → évaluation des impacts de la FA métallique dans nos laboratoires

- Bureaux d'études
  - Nouveaux logiciels
  - Nouveaux modes de conception
  - Apprendre à sous-traiter
- Sous-traitants en France
  - Liste des sociétés
    - Leurs structures
    - Le ou les procédés utilisés
    - Leurs savoirs-faire
- Technologies disponibles
  - Opérationnelles ou en phase de R&D
  - Matériaux, poudres utilisées, H&S,...
  - Coût de l'acquisition d'une machine de FA
    - Humain
    - Financier
- Post-traitement
  - Reprise d'usinage
  - Traitement thermique
  - Amélioration des états de surface

## Retour d'expérience sur la réalisation de prototypes



## Introduction

## Objectifs du projet 3D Métal

## Les procédés de FA métal

## Les partenaires

## Essais de traction - Analyses de surface - Tenue au vide

## Pièces réalisées en FA

## Conclusion



## Les procédés de FA métal

### Sur lit de poudre

#### **Fusion sélective par laser (SLM : Selective Laser Melting)**

Fusion par un laser d'une poudre métallique dans une atmosphère contrôlée

Acier inoxydable, acier à outils, chrome-cobalt, inconel, aluminium, titane

#### **Fusion par faisceau d'électrons (EBM : Electron Beam Melting)**

Fusion par un canon à électrons d'une poudre métallique dans une atmosphère contrôlée

Aluminure de titane, Inconel 718, cobalt-chrome

### Apport direct

#### **Projection de poudre en fusion (CLAD : Construction Laser Additive Directe)**

Projection de poudre métallique injectée et fondu dans un faisceau laser

Acier inoxydable, acier à outils, chrome-cobalt, inconel, aluminium, titane

#### **Dépôt de fil en fusion (WAAM : Wire Arc Additive Manufacture)**

Dépôts de fils métalliques fondu par faisceau d'électrons ou plasma

Titane, aluminium, nickel, acier maraging, acier inoxydable, chrome-cobalt

# Machines à fusion des métaux

## SLM 500 HL

Fusion laser sur lit de poudre (SLM)  
(Selective Laser Melting)



### SLM Solution

R & D et production  
de pièces complexes

**Acier inoxydable, acier à outils, chrome-cobalt, inconel, aluminium, titane**

## Mobile CLAD

Projection de poudre en fusion (CLAD)  
(Construction Laser Additive Directe)



### BeAM

Fabrication et réparation  
de pièces complexes

## ARCAM A2X

Fusion par faisceau d'électrons (EBM)  
(Electron Beam Melting)



### ARCAM

Pièces structurelles en alliages  
de titane pour l'aéronautique

**Titane, Inconel 718, cobalt-chrome**

# Machines à fusion des métaux

## Centres d'usinages hybrides

### LASERTEC 65 3D

Projection de poudre en fusion (CLAD)  
(Construction Laser Additive Directe)



DMG MORI

### L'INTEGREX i-400AM

Projection de poudre en fusion (CLAD)  
(Construction Laser Additive Directe)



MAZAK

### LUMEX Avance-25

Fusion laser sur lit de poudre (SLM)  
(Selective Laser Melting)



MATSURA

Aciers inox, inconels, tungstène-nickel, bronze, laiton, alliages Cr-Co-molybdène, stellite, acier à outils



## Introduction

## Objectifs du projet 3D Métal

## Les procédés de FA métal

## Les partenaires

## Essais de traction - Analyses de surface - Tenue au vide

## Pièces réalisées en FA

## Conclusion

## AGS Fusion filiale du groupe AGS

Fabrication additive inox et titane. **Procédé SLM**

Petite structure

- Deux machines à fusion des métaux **EOS M290 et SLM Solution 280 H**
- Quatre personnes



**AGS Fusion**

35 route du champ Biolay  
01580 Izernore



**BV Proto**  
Rue de Leupe  
90400 Sévenans

## PME-PMI : BV Proto

Fabrication additive inox. **Procédé SLM**

Petite structure

- Deux machines à fusion des métaux **EOS M270 et EOS M280**
- Deux personnes



**BV PROTO** est adossé à une structure de recherche :  
le **LERMPS-UTBM-PERSEE** qui conduit des travaux de recherche,  
entre autre, sur l'élaboration de poudres par atomisation.

Contrats de **collaboration-recherche** signés en septembre 2017



## LMS de l'école Polytechnique

**Procédé CLAD** de projection de poudre  
dans un faisceau laser



Machine BeAM

Laboratoire de Mécanique des Solides



## Plateforme Gi Nova Primeca

**Procédé EBM** de fusion des métaux  
sous faisceau d'électrons



Machine ARCAM

Institut National Polytechnique

**Lettres d'intention en cours de rédaction**



## Introduction

## Objectifs du projet 3D Métal

## Les procédés de FA métal

## Les partenaires

# Essais de traction - Analyses de surface - Tenue au vide

## Pièces réalisées en FA

## Conclusion

# Essais de traction

Comparer la **tenue mécanique** d'éprouvettes réalisées en **fabrication additive** par **différents procédés** avec des éprouvettes réalisées en **fabrication standard**



Machine de traction MTS-30M  
de 150 kN

## Matériaux

- Inox 316 L
- Titane TA6V

## Procédés

- SLM
- EBM
- CLAD

## Températures

- 293 K
- 77 K
- 4,2 K



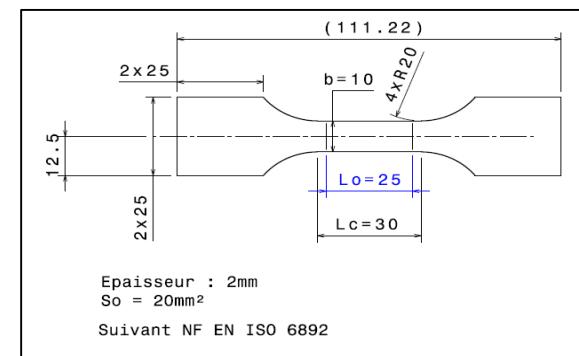
Machine de traction Instron  
de 150 kN - 2 cryostats

- Couche par couche  
⇒ anisotrope
- Trois sens de fabrication  
 $0^\circ$ ,  $45^\circ$  et  $90^\circ$
- Machine, programme



4 séries d'éprouvettes  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  et témoins

J. Laurence (CPPM), A. Gonnin (LAL), BV Proto



Epaisseur : 2mm  
So = 20mm<sup>2</sup>

Suivant NF EN ISO 6892

Eprouvette de traction normalisée

# Analyses de surface

## Caractérisation de surface de matériaux réalisés en fabrication additive

Résultats préliminaires nécessitant un approfondissement de l'étude ainsi qu'un **renforcement significatif** du nombre de mesures **avant toute conclusion**

### Mesure de densité par la méthode d'Archimède

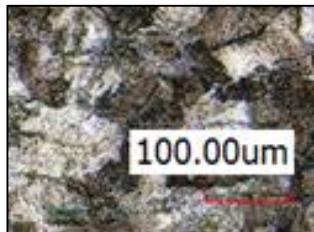
- Densité : **7.86**  $\pm$  0.05 g.cm<sup>3</sup> (Moyenne sur 2 échantillons)
- Densité : **7.58**  $\pm$  0.05 g.cm<sup>3</sup> (Moyenne sur 2 échantillons)

### Analyse microstructure – MEB

- Composition apparentée à un 316L standard
- Échantillon homogène dans sa composition

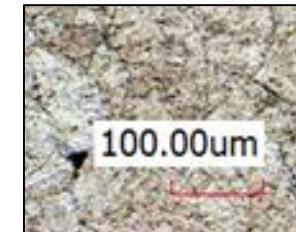
- Composition apparentée à un 316L standard
- Échantillon homogène dans sa composition

### Analyse chimique - MEB-EDX - Microscope confocal



- Microstructure en grain, **cristalline**

AGS Fusion - Machine SLM Solution 280 H - Procédé SLM  
Programme constructeur – Ep. couches : 20  $\mu$ m



- Microstructure « **en écailles** »

BV Proto - Machine EOS M280 - Procédé SLM  
Programme maison – Ep. couches : 40  $\mu$ m

Groupe technologies vide et surfaces du LAL : **S. Bilgen, B. Mercier**

# Tenue au vide et fabrication additive

Comparer la **tenue au vide** de tubes à **embout KF et CF** réalisés en **fabrication additive** par **différents procédés** avec des tubes de géométries identiques réalisés en **fabrication standard**

## Matériaux

- Inox 316 L
- Titane TA6V

## Procédés

- SLM
- EBM
- CLAD

## Etanchéité

- Viton
- Aluminium
- Cuivre

## Partenaires :

- Société BV Proto
- Société AGS Fusion
- Laboratoire de Mécanique des Solides
- Plateforme Gi Nova Primeca



Tube à embout CF



Tube à embout KF

Groupe technologies vide et surfaces du LAL : **S. Bilgen, M. Alves, D. Grasset, F. Letellier, B. Mercier, É. Mistretta**

# Tenue au vide et fabrication additive

Comparaison de la tenue au vide de tubes réalisés en FA avec un tube standard



Installation de test avec détecteur et jauge



- Joints Viton
- Brut de FA
- 2 sociétés
- Embout KF
- Inox 316 L
- Procédé SLM

- Test de fuite à l'hélium
- Descente en pression jusqu'au vide limite
- Mesure de la remontée de pression en vide statique

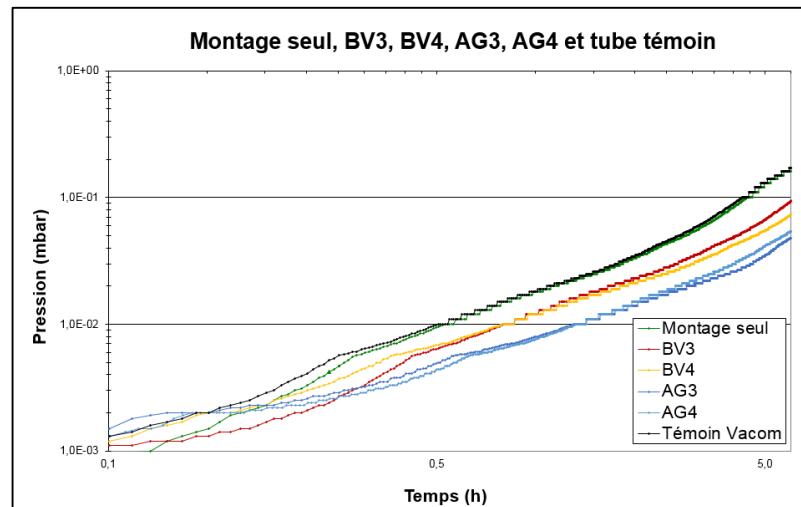


Tubes à embout KF

- Usinage des portées de joints
- Pas de problèmes d'étanchéité
- Vide limite entre **2.10<sup>-5</sup> et 1.10<sup>-5</sup> mbar**
- **Remontée de pression semblable à celle du tube témoin**
- Pas de mesure du taux de dégazage

Article "publié dans le "Journal of Physics"

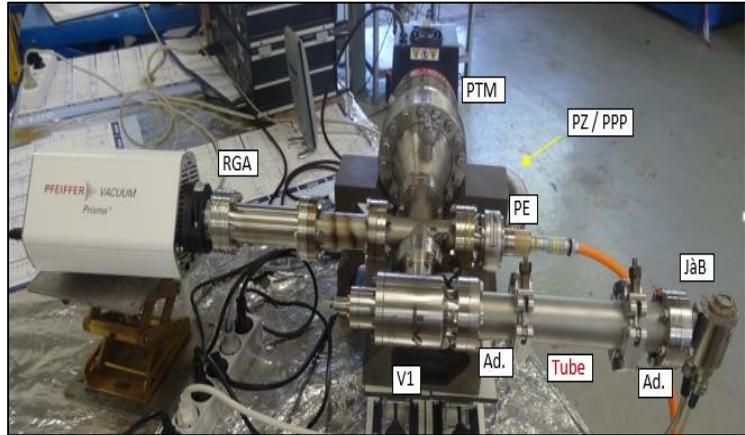
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/874/1/012097>



Auteurs : **S. Jenzer<sup>1</sup>, M. Alves<sup>1</sup>, N. Delerue<sup>1</sup>, A. Gonnin<sup>1</sup>, D. Grasset<sup>1</sup>, F. Letellier-Cohen<sup>1</sup>,  
B. Mercier<sup>1</sup>, E. Mistretta<sup>1</sup>, Ch. Prevost<sup>1</sup>, A. Vion<sup>2</sup>, JP. Wilmes<sup>3</sup> (1 : LAL - 2 : BV Proto - 3 : AGS Fusion)**

# Tenue au vide et fabrication additive

Comparaison de la tenue au vide de tubes réalisés en FA avec un tube standard



Montage de mesure du taux de dégazage

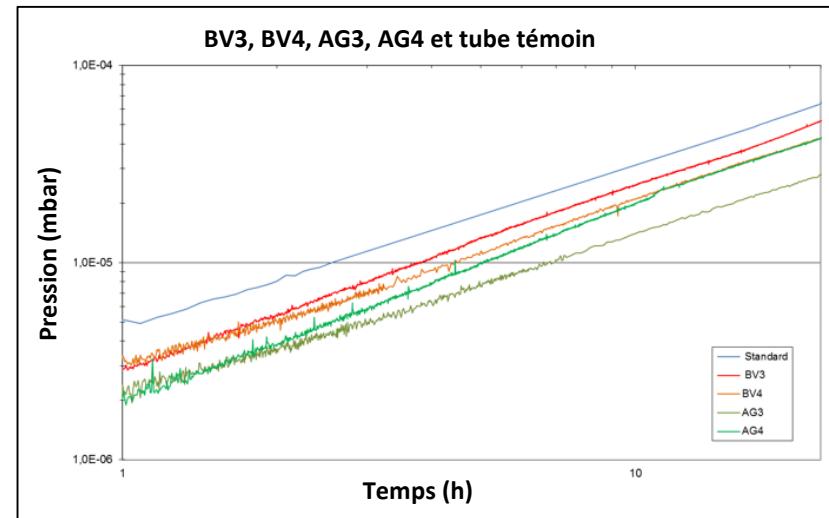
- Vide atteint entre :  $4 < V < 9.10^{-9}$  mbar
- **Taux de dégazage semblable à celui du tube témoin**
- Gaz résiduel : principalement de la vapeur d'eau
- **Spectres de masse semblables à celui du tube témoin**

- Joints Aluminium
- Brut de FA
- 2 sociétés
- Embout KF
- Inox 316 L
- Procédé SLM



Tubes à embout KF

- Descente en pression pendant au moins 100h
- Mesure du taux de dégazage "méthode par accumulation"
- Spectres de masse par RGA (Residual Gas Analyzer)



Courbes de remontée de pression

Groupe technologies vide et surfaces du LAL : **M. Alves, S. Bilgen, D. Grasset, F. Letellier, B. Mercier, É. Mistretta**



## Introduction

### Objectifs du projet 3D Métal

### Les procédés de FA métal

### Les partenaires

### Essais de traction - Analyses de surface - Tenue au vide

## Pièces réalisées en fabrication additive

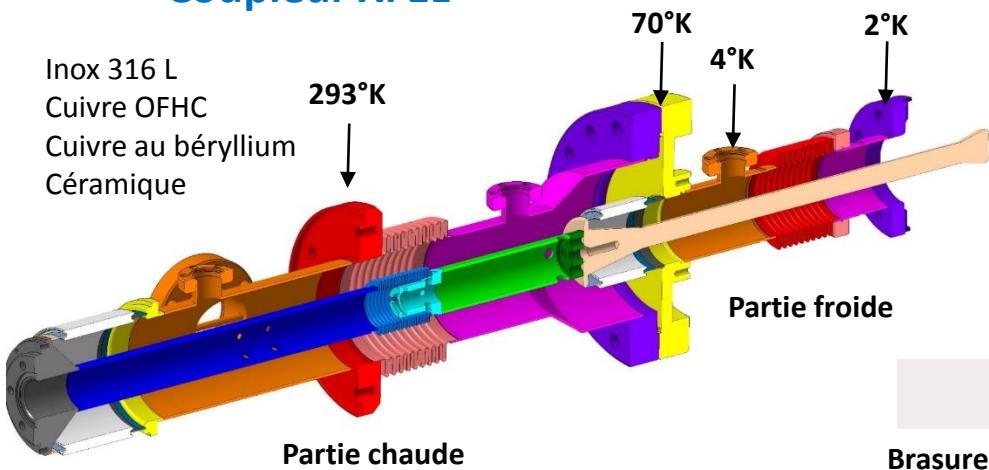
### Conclusion

# Coupleurs de puissance HF

pour cavités supraconductrices

## Coupleur XFEL

- Inox 316 L
- Cuivre OFHC
- Cuivre au beryllium
- Céramique

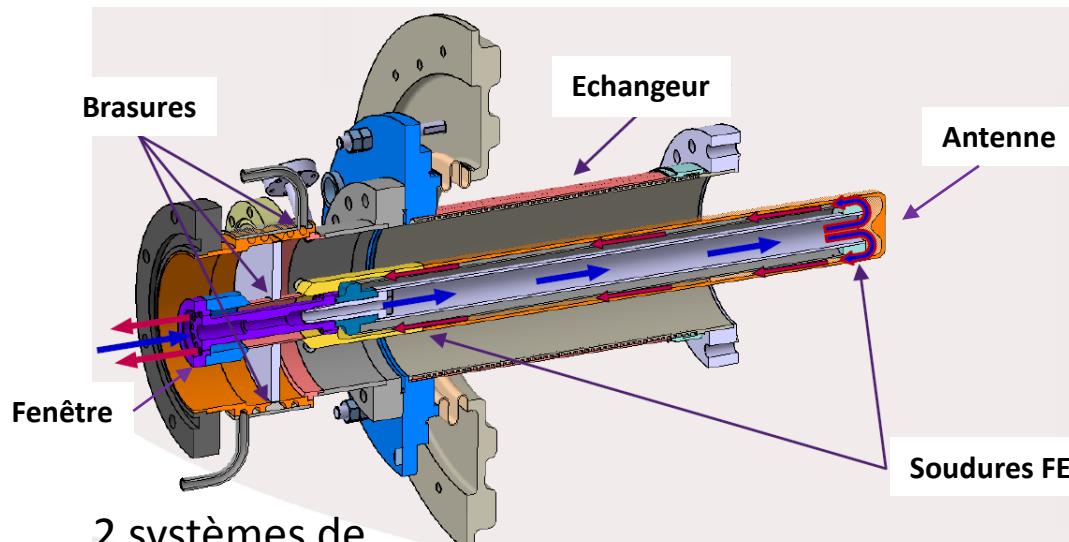


- Cryogénie
- HF
- Vide  $10^{-9}$  mbar
- Brasures
- Flashe nickel
- Dépôts de cuivre



Alliage bronze sur inox standard

## Coupleur ESS 352 MHz



- Diminuer le nombre de composants
- Canaux de refroidissement
- FA cuivre
- Bi métal cuivre - acier inox

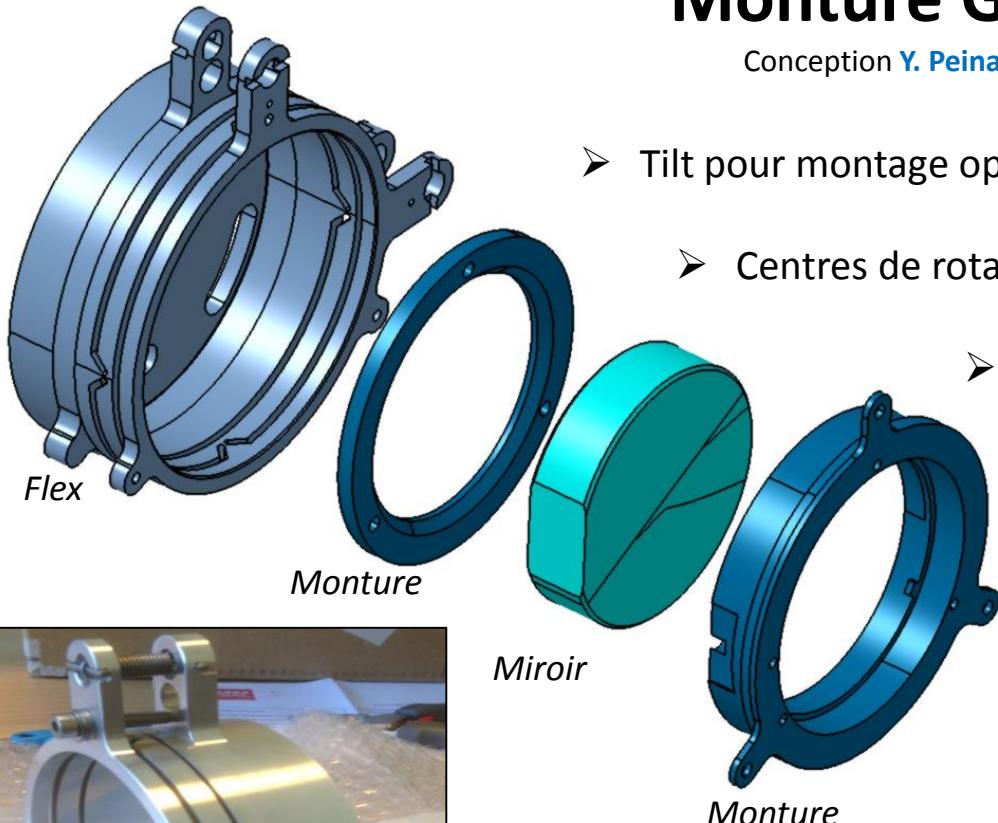
2 systèmes de  
refroidissement :

- fenêtre
- antenne (double enceinte)

# Monture Gimbal

Conception **Y. Peinaud** (LAL)

- Tilt pour montage optique
- Centres de rotation confondus
- Tilt adapté aux contraintes du vide
- Matière TA6V ou 316 L
- Réalisable en découpe à fil  
Problème : dépôt de zinc



Montures Gimbal- Ø 98 mm, ép. 43 mm



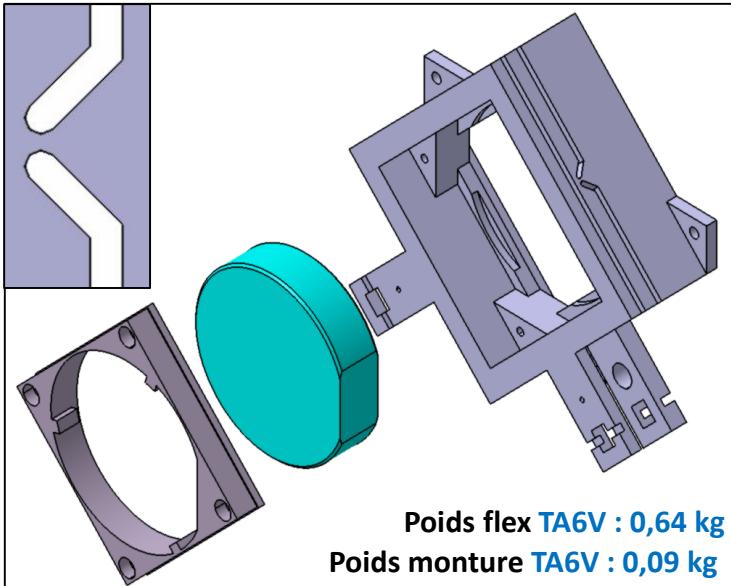
Montures de petite dimension  
Ø 34 mm, ép. 10 mm

**Poids flex TA6V : 0,48 kg**  
**Prix : 1400 €**

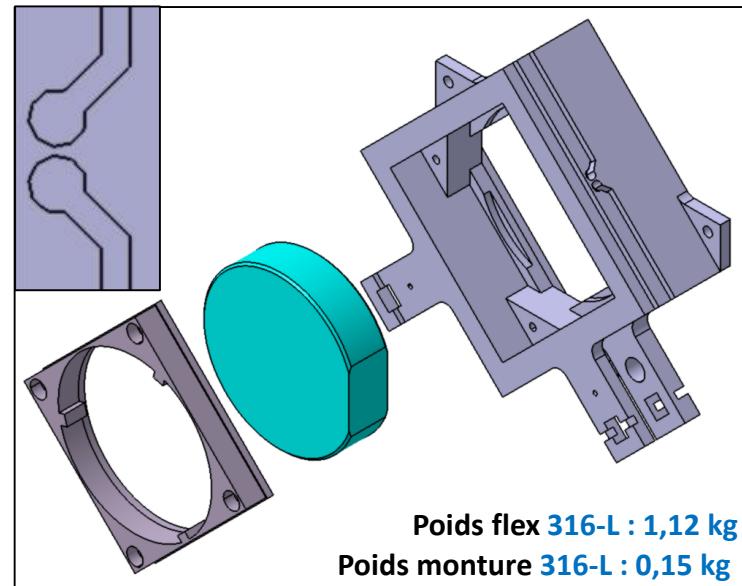
**Poids montures 316-L : 0,48 kg**  
**Prix : 500 €**

# Monture Gimbal

Conception pour fabrication additive **A. Gonnin** (LAL)



Procédé **EBM** – Matière **TA6V**

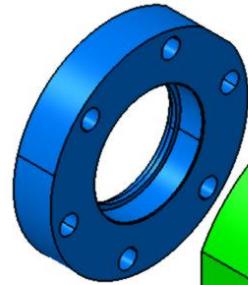


Procédé **SLM** – Matière **316-L**

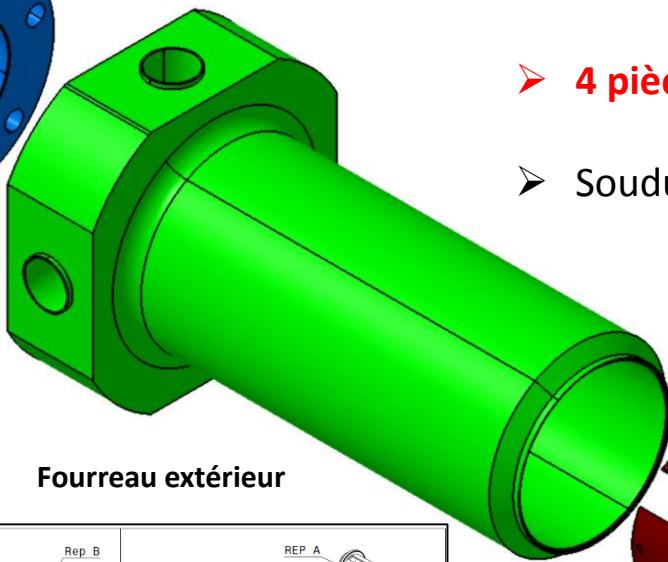
- Diminution du nombre de composants
- Diminution du poids
- Diminution des coûts et du temps de fabrication
- Montures de très petites dimensions
- Problème de l'état de surface
- Travail en fatigue

# Beam Position Monitor stripline

Mesureur de position de faisceau BE LAL pour ThomX : [Didier Auguste](#)



Bride DN40CF

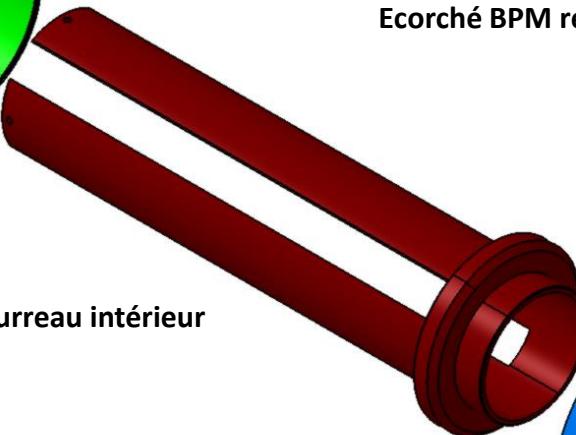


Fourreau extérieur

- 4 pièces
- Soudures



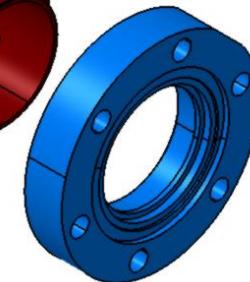
Ecorché BPM réalisation atelier du LAL



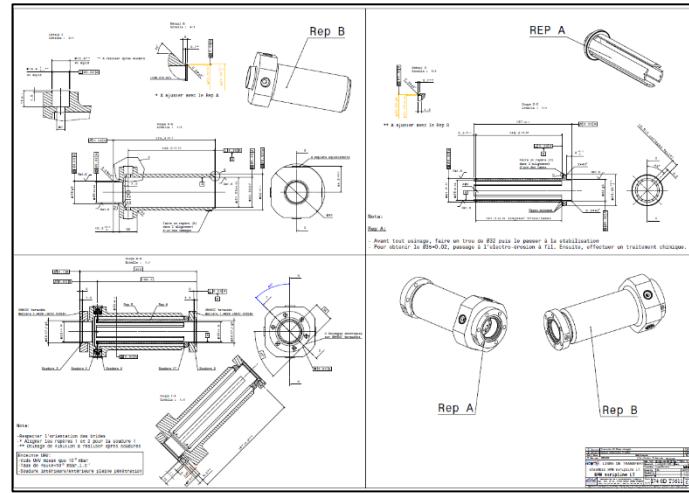
Fourreau intérieur

- Poids : 2,9 kg
- Prix : ???? €

- Vide :  $10^{-9}$  mbar
- Inox : 316 L



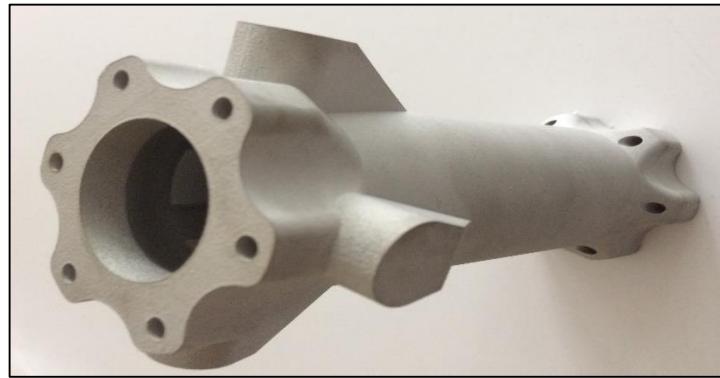
Bride DN40CF



Plan de fabrication BPM

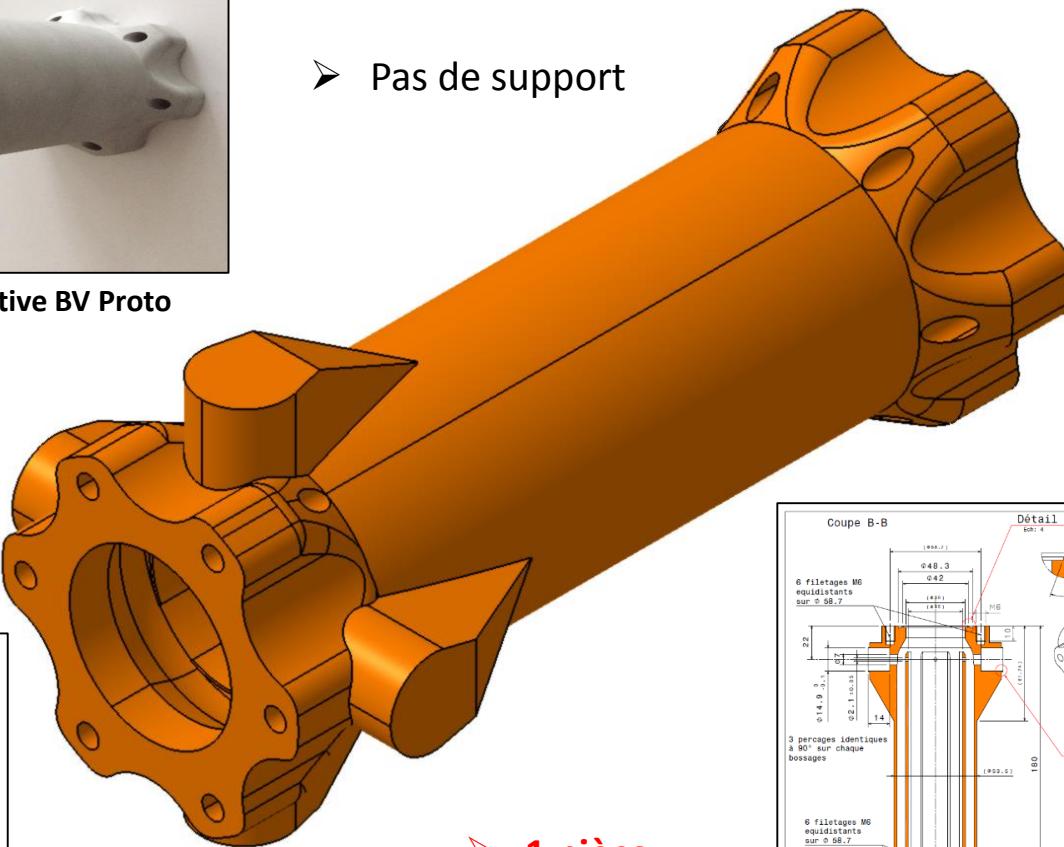
# Beam Position Monitor stripline

Calculs et optimisation topologique **J. Bonis** (LAL)

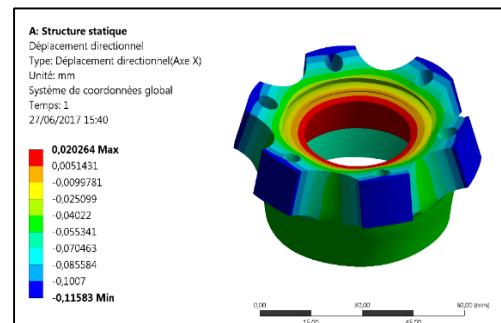


BPM réalisé par fabrication additive BV Proto

- Conception pour la FA
- Pas de support

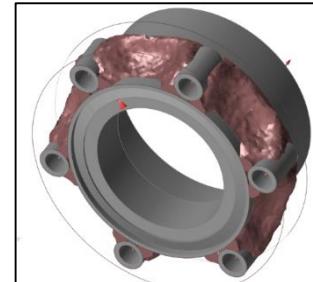


➤ 1 pièce

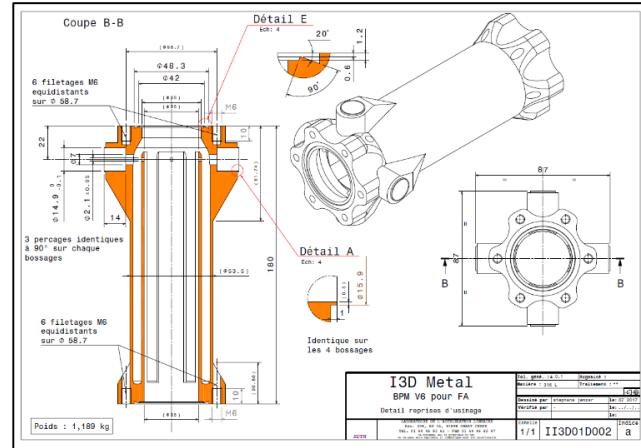


Calcul éléments finis ANSYS

Optimisation topologique



INSPIRE d'ALTAIR



Plan de reprise après fabrication additive

# Beam Position Monitor stripline

## ➤ Diminution du temps de conception

- Envoi d'un fichier
- Plan de reprise

## ➤ Diminution du temps de fabrication

- Temps de fabrication : 36 h  
Réception :  $t < 1$  semaine
- Temps d'usinage :  $t < 1$  semaine
- Temps de fabrication traditionnelle :  $t \approx 6$  semaines

## ➤ Diminution du nombre de composants

- De 4 pièces à 1 pièce

## ➤ Diminution du poids de 2/3

## ➤ Diminution du coût

## ➤ Géométrie plus proche des simulations

- Réalisation des lames ép. 2 mm
- Lames réalisées en usinage ép. 3 mm
- Pièce plus précise : absence de soudures

➤ **L'état de surface peut être un problème (rugosité)**



## Introduction

## Objectifs du projet 3D Métal

## Les procédés de FA métal

## Les partenaires

## Essais de traction - Analyses de surface - Tenue au vide

## Pièces réalisées en fabrication additive

## Conclusion

## Conclusion

- Petites séries, pièces complexes, ↘ nbr de pièces , ↘ délais de fabrication
  - Pas de corrélation → complexité / prix
- 
- Anisotrope, retraits → contraintes/traitement thermiques
  - Supports, rugosité → états de surface/post traitement
  - Reproductibilité → procédé, sens de fabrication, machine, programme....
  - H&S
- 
- Nouvelle conception - Ne remplace pas la fabrication soustractive mais la complète.
    - Poudres → nouveaux matériaux
    - FA du cuivre
    - Pièces multi matériaux
    - Machines hybrides
  - Capteurs et électronique intégrés



## Remerciements



M. Alves (LAL), D. Auguste (LAL), JJ. Bertrand (BV Proto), JL. Biarrotte (IN2P3), S. Bilgen (LAL), J. Bonis (LAL), H. Carduner (SUBATECH), AM. Cauchois (LLR), E. Charkaluk (LMS), A. Constantinescu (LMS), G. Deleglise (LAPP), N. Delerue (LAL), A. Di-Donato (INP), S. Durbecq (LMS), H. Franck de Preamont (LPC), F. Gautier (LAL), J. Giraud (LPSC), A. Gonnin (LAL), D. Grasset (LAL), E. Guerard (LAL), W. Kaabi (LAL)



M. Krauth (IPHC), J. Laurence (CPPM), F. Letellier-Cohen (LAL), P. Marie (LMS), G. Mercadier (LAL), B. Mercier (LAL), E. Mistretta (LAL), C. Olivetto (IN2P3), Y. Peinaud (LAL), F. Peltier (LAPP), A. Poizat (C2N), Ch. Prevost (LAL), Ph. Repain (LPNHE), S. Roni (LPSC), M. Roy (LLR), G. Sattonnay (CSNSM), G. Vantesteenkiste (AGS Fusion), L. Vatrinet (IPNO), F. Vignat (INP), A. Vion (BV Proto), JP. Wilmes (AGS Fusion)





Merci de votre attention !