

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 Preaumont, 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

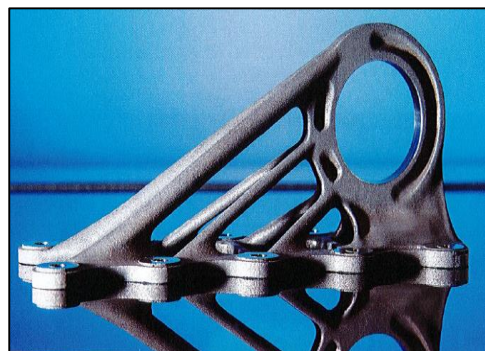
Historique

- 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**.

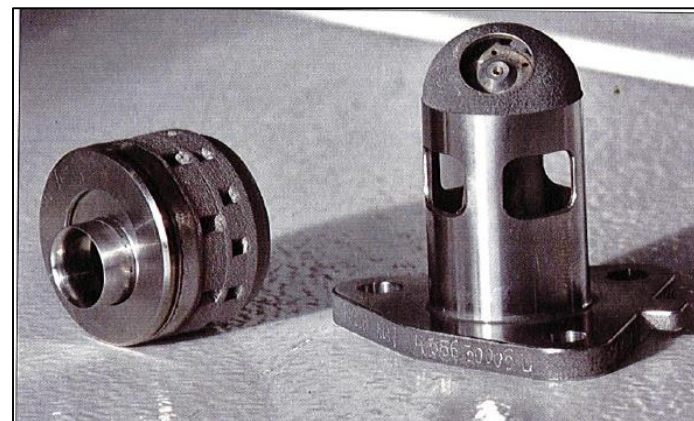
Préambule

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
- Fabrication directe de petites séries sans outillage
 - Diminution du nombre de pièces dans un ensemble
 - Pas de corrélation entre la complexité d'un objet et son prix
 - Réduction des délais de fabrication



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 \Rightarrow 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 fondue 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 fondus 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 structurales en alliages
de titane pour l'aérospatiale

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

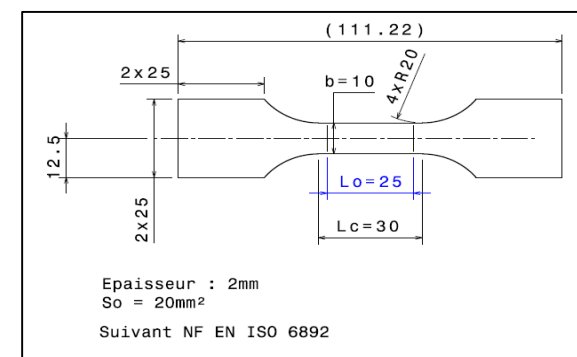


Machine de traction Instron
de 150 kN - 2 cryostats



4 séries d'éprouvettes 0°, 45°, 90° et témoins
J. Laurence (CPPM), A. Gonnin (LAL), BV Proto

- Couche par couche
⇒ anisotrope
- Trois sens de fabrication
0°, 45° et 90°
- Machine, programme



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**

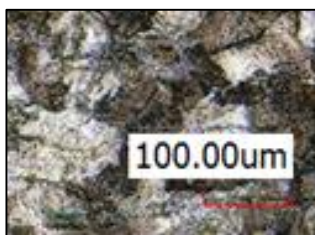
Mesure de densité par la méthode d'Archimède

- Densité : **7.86** \pm 0.05 g.cm³ (Moyenne sur 2 échantillons)
- Densité : **7.58** \pm 0.05 g.cm³ (Moyenne sur 2 échantillons)

Analyse microstructure – MEB

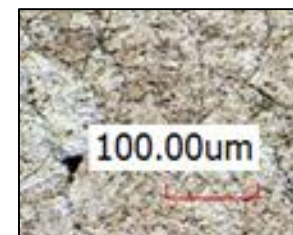
- Composition apparentée à un 316L standard
- Échantillon homogène dans sa composition
- Composition apparentée à un 316L standard
- Échantillon homogène dans sa composition

Analyse chimique - MEB-EDX - Microscope confocal



- Microstructure en grain, **cristalline**

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



- Microstructure « **en écailles** »

BV Proto - Machine EOS M280 - Procédé SLM
Programme maison – Ep. couches : 40 μ 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
- Laboratoire de Mécanique des Solides
- Société AGS Fusion
- 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 jauges

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

Article "publié dans le "Journal of Physics"

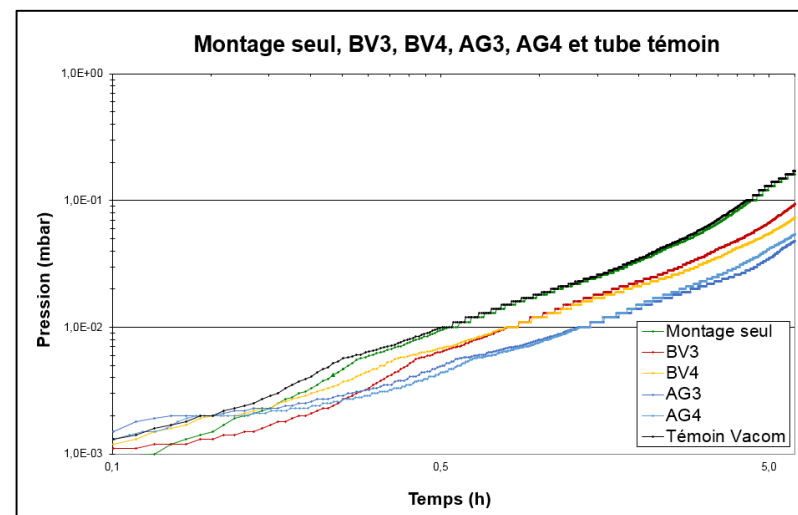
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/874/1/012097>

- **Joint 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



Courbes de remontée de pression

Auteurs : S. Jenzer¹, M. Alves¹, N. Delerue¹, A. Gonnin¹, D. Grasset¹, F. Letellier-Cohen¹, B. Mercier¹, E. Mistretta¹, Ch. Prevost¹, A. Vion², JP. Wilmes³ (1 : LAL - 2 : BV Proto - 3 : AGS Fusion)

Tenue au vide et fabrication additive

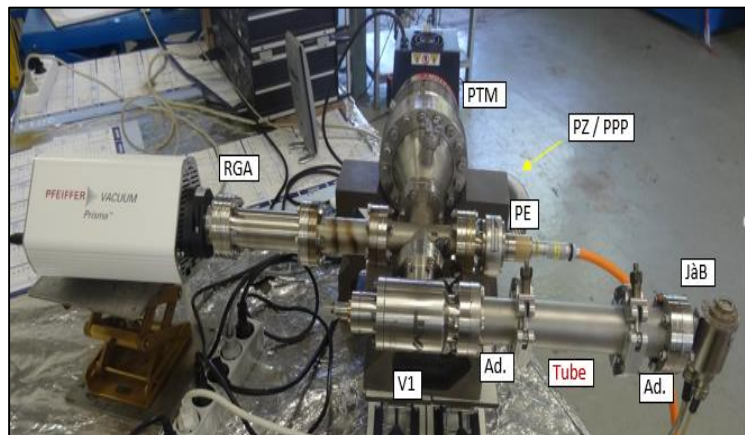
Comparaison de la tenue au vide de tubes réalisés en FA avec un tube standard

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



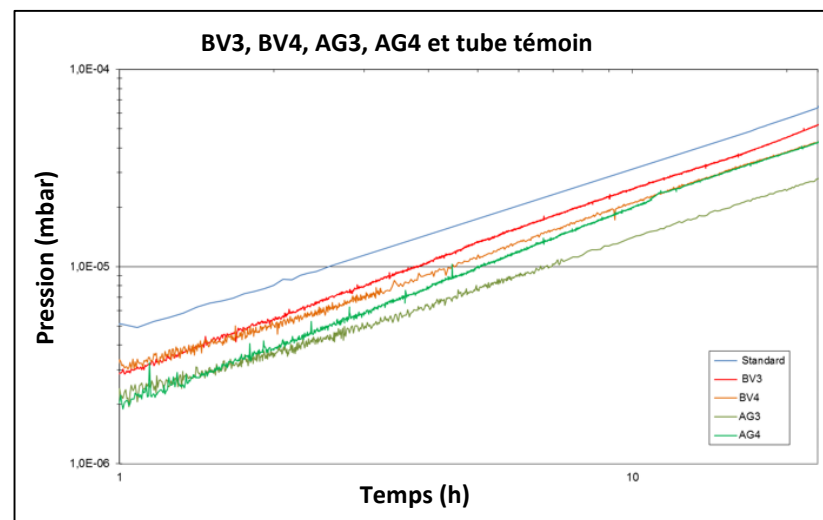
Tubes à embout KF

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



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**



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

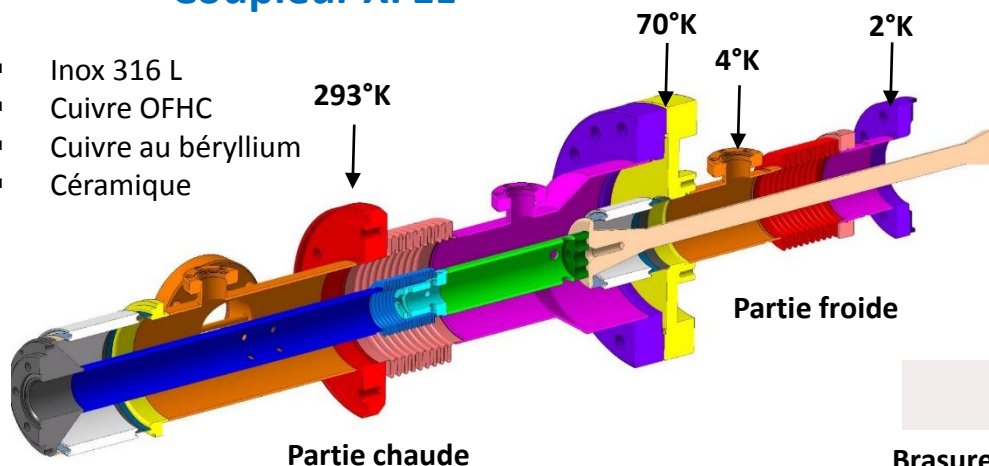
Conclusion

Coupleurs de puissance HF

pour cavités supraconductrices

Coupleur XFEL

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

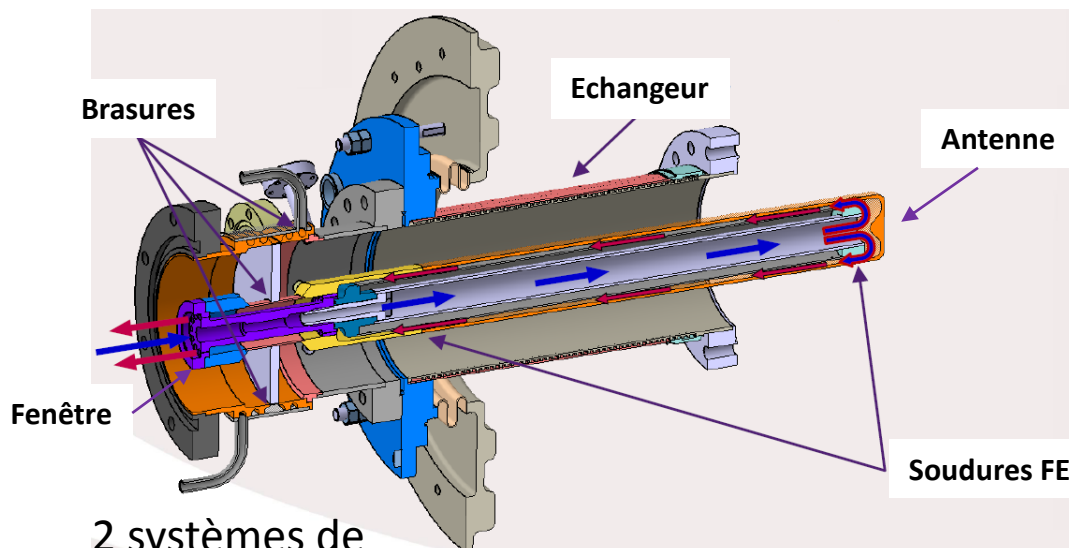


- Cryogénie
- HF
- Vide 10^{-9} mbar
- Brasures
- Flashe nickel
- Dépôts de cuivre



Alliage bronze sur inox standard

Coupleur ESS 352 MHz



2 systèmes de refroidissement :

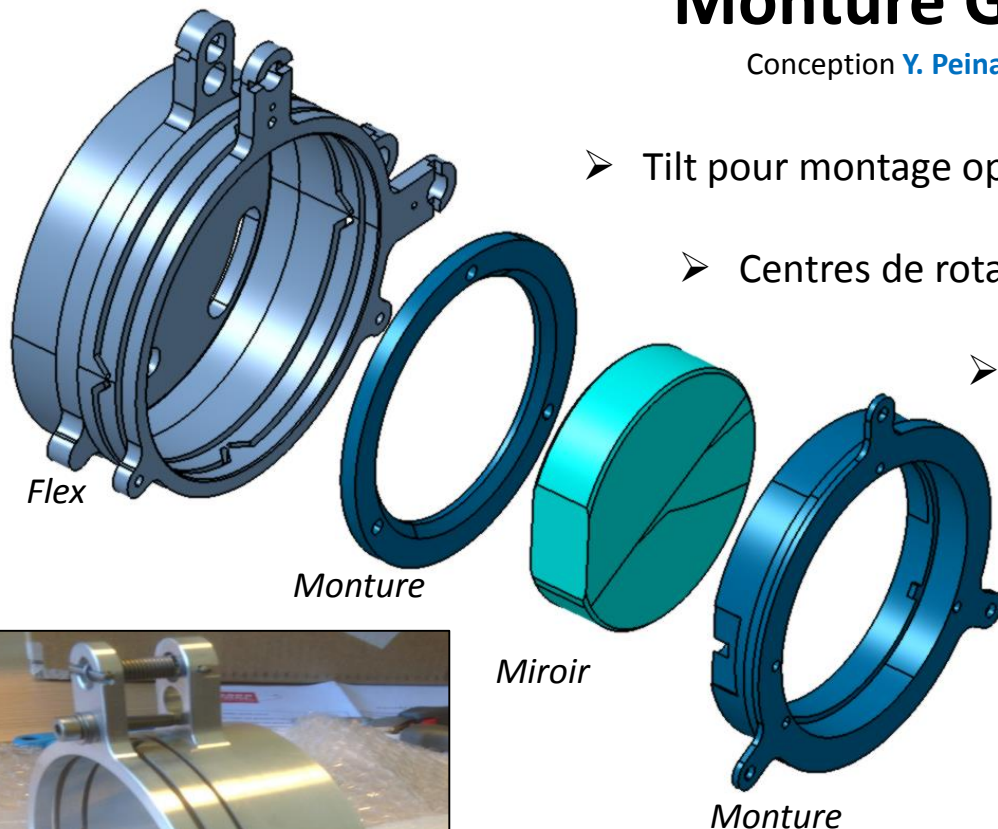
- fenêtré
- antenne (double enceinte)

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

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 de petite dimension
Ø 34 mm, ép. 10 mm



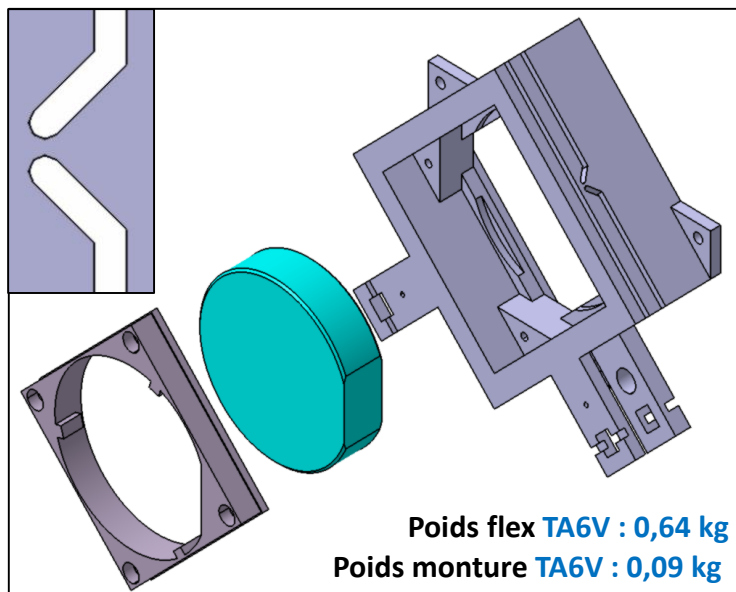
Ensemble Gimbal
Ø 98 mm, ép. 43 mm

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

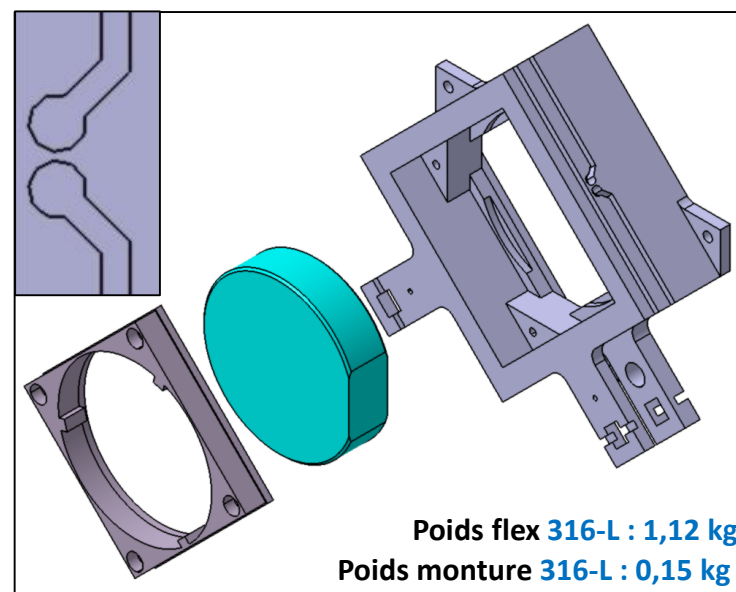
Poids montures 316-L : 0,48 kg
Prix : 500 €

Monture Gimbal

Conception pour fabrication additive A. Gonnin (LAL)



Procédé EBM – Matière TA6V

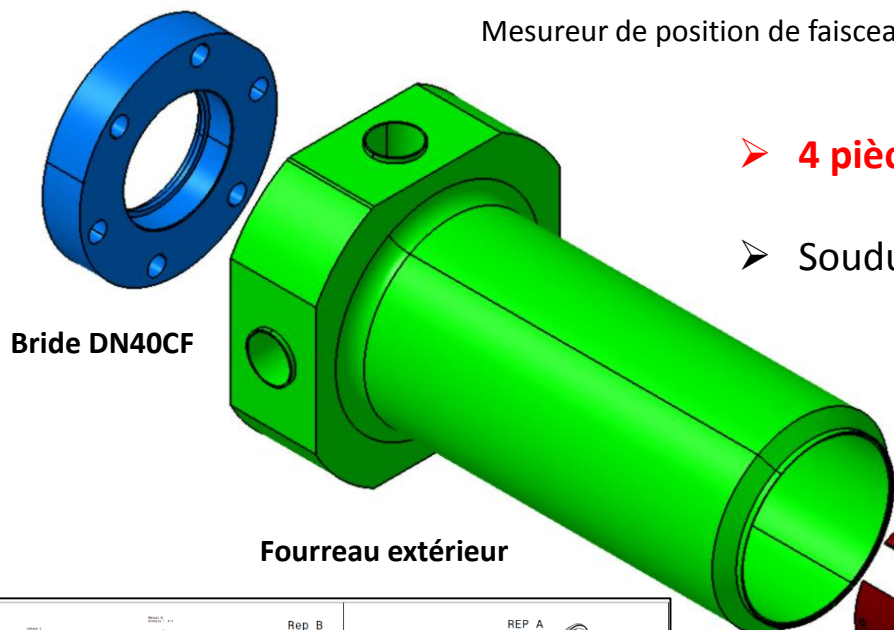


Procédé SLM – Matière 316-L

- 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

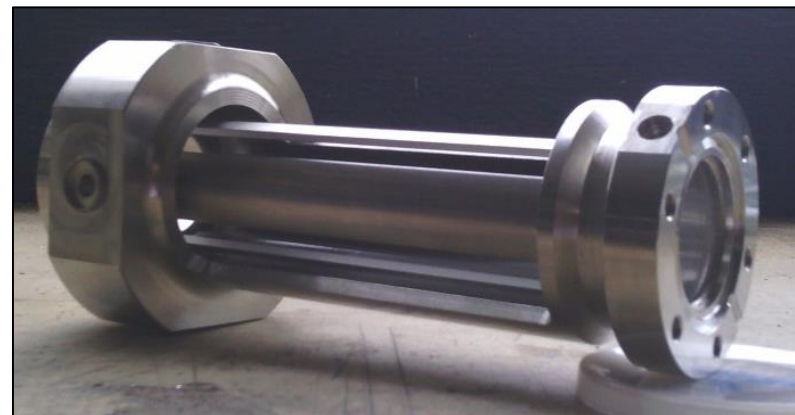
Beam Position Monitor stripline

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



➤ 4 pièces

➤ Soudures



Ecorché BPM réalisation atelier du LAL

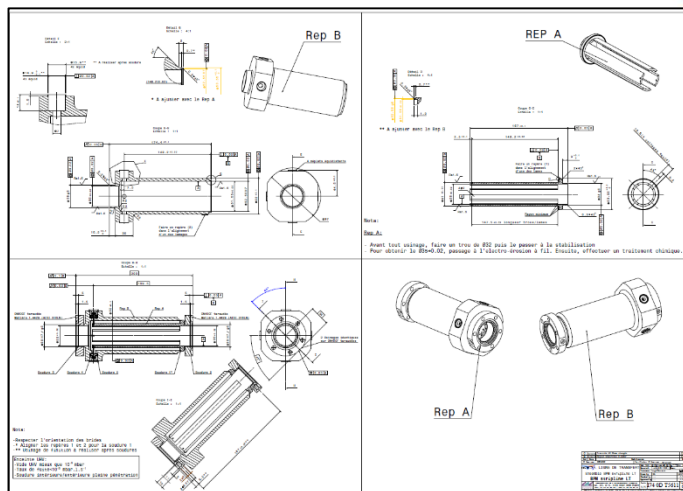
➤ Poids : 2,9 kg

➤ Prix : ???? €

Fourreau intérieur

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

Bride DN40CF

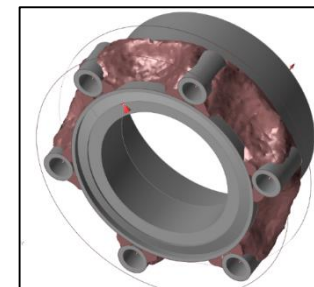


Plan de fabrication BPM

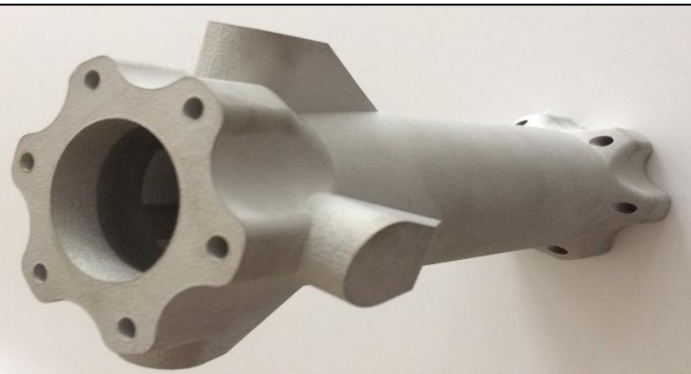
Beam Position Monitor stripline

Calculs et optimisation topologique J. Bonis (LAL)

Optimisation topologique



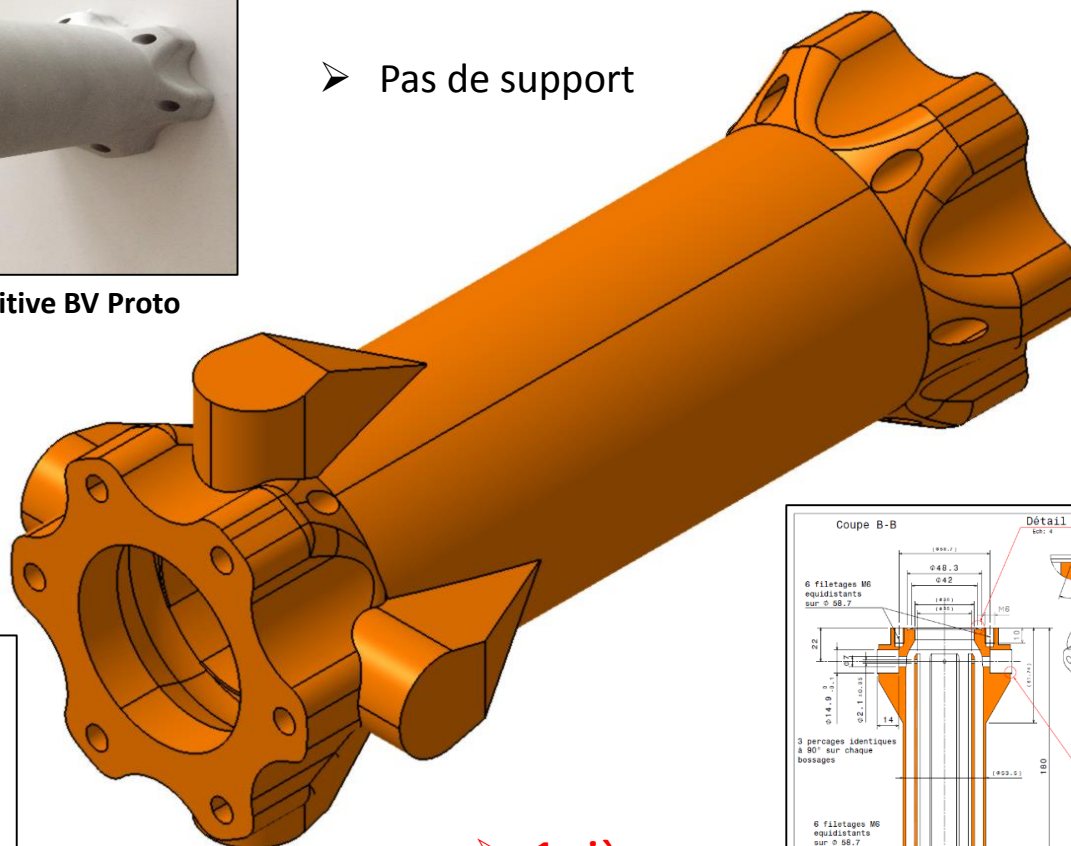
INSPIRE d'ALTAIR



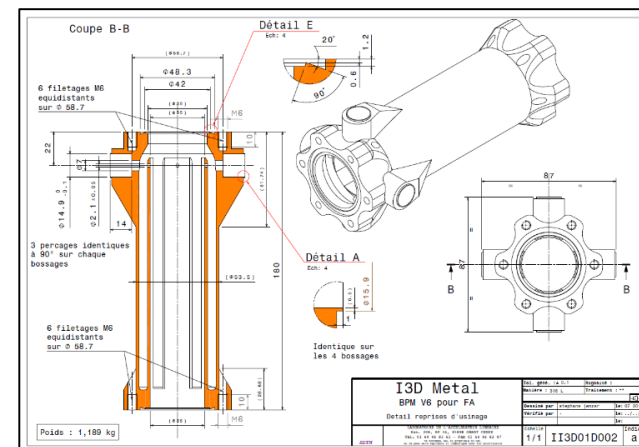
BPM réalisé par fabrication additive BV Proto

Poids : 1,2 kg

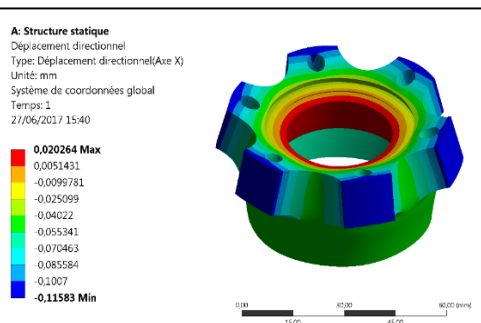
Prix : 2730 €



➤ 1 pièce



Plan de reprise après fabrication additive



Calcul éléments finis ANSYS

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 Preaumont (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 !