



L'impression **3D** : où en sommes-nous ?



Introduction

La FA au LAL

Valeurs ajoutées de la FA pour nos thématiques

Les procédés de FA métal

Prospective sur la FA métal pour les laboratoires de l'IN2P3

Objectifs du projet 3D Métal

Optimisation topologique

Les partenaires

Caractérisation d'échantillons

Réalisations possibles en FA

Conclusion

Historique

- 1952** **Kojima** démontre les avantages de la fabrication par couches superposées.
- 1984** **1^{er} brevet** par le français **Jean-Claude André**, suivi par l'américain **Chuck Hull** 1 mois plus tard.
- 1986** Chuck Hull crée **3D Systems**.
- 1988** Sortie par 3D Systems de la toute **1^{ère} imprimante 3D**, la SLA-250. **Scott et Lisa Crump** créent l'entreprise **Stratasys** - Développement du procédé **FDM** (Fused Deposition Molding).
- 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.
- 1997** Fondation de **ARCAM** (Suède) et lancement du procédé **EBM** (Electron Beam Melting).
- 2000** **Fabrication rapide**. La fabrication additive est utilisée pour des pièces de production en petites et moyennes séries. Développement de la technologie **SLM** (Selective Laser Melting).
- 2002** **1^{ère} implantation** d'une machine **EBM** dans l'industrie.
- 2014** **DMG-MORI** (Allemagne - Japon) présente la **1^{ère} machine hybride additive/soustractive**.
- 2011 – 2014** Augmentation des ventes d'imprimantes 3D de **150 % / an** en moyenne.

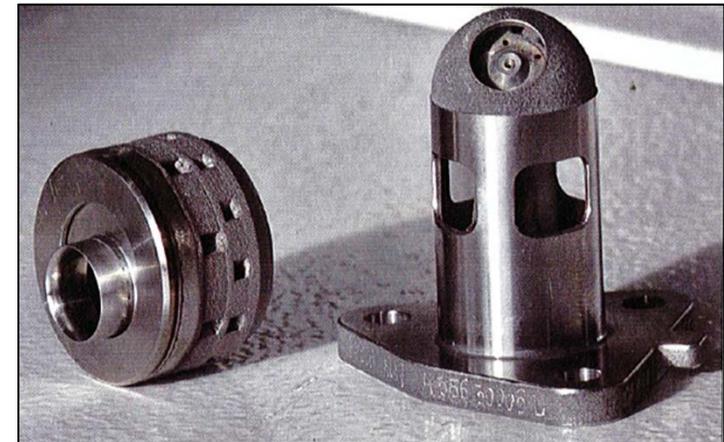
Préambule

Impression 3D est un terme de marketing inventé pour remplacer le nom de **stéréolithographie**. 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

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

Préambule

La **FA** 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)

- Polymérisation d'une résine sous l'action d'un laser
- Projection de gouttes de matériau
- Projection d'un liant sur un substrat de type poudre
- **Solidification de poudre** sous l'action d'une source d'énergie de moyenne à très forte puissance (*laser ou faisceau d'électrons*)
- **Projection de poudre** (ou fusion de fil) dans un flux d'énergie (*laser ou plasma*)
- **Fusion de fil** au travers d'une buse chauffante
- Assemblage de couches à partir de feuilles ou de plaques découpées

Principe de la FA

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 des supports, reprises d'usinage, traitements thermiques, chimiques....

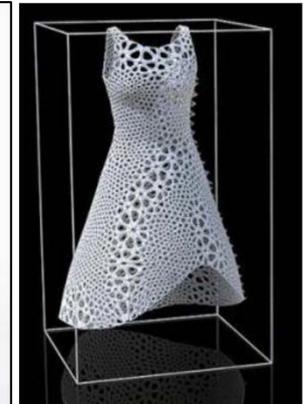
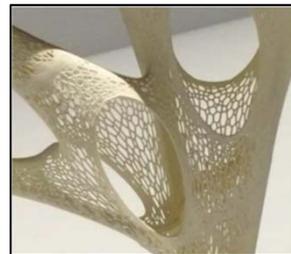
Design

La FA, cela peut être ceci.....ou bien.....ou encore....

Gazon en 3D

Mode

I3D alimentaire



La **FA**, cela peut être ceci.....ou bien....ou encore....

Dentaire



Appareils et prothèses dentaires fabriqués avec l'impression 3D

Prothèses



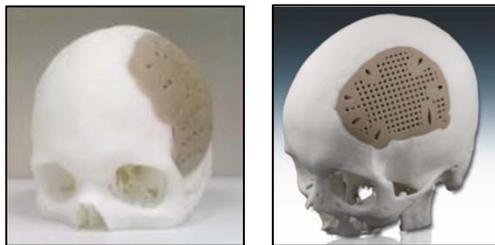
FDM = Fused Deposition Modeling = Extrusion à chaud

Bioprinting ? = dépôt en 3D de biomatériaux contenant des cellules, afin d'obtenir un tissu avec des fonctions biologiques spécifiques

Déjà imprimés avec succès :

- Peau
- Os
- Oreille
- Nerf
- Valves cardiaques
- Trachée
- Urètre

Implants médicaux



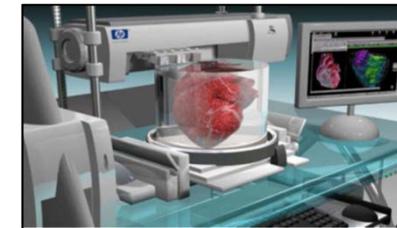
Implants crâniens

Chirurgie

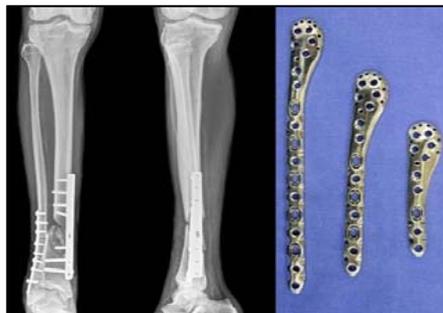


Cœur imprimé à l'aide d'une I3D

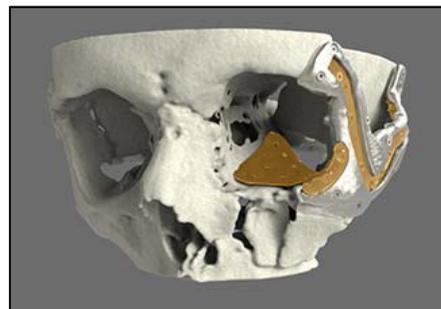
Dans quelques années : bio impression d'organe = organe à la demande



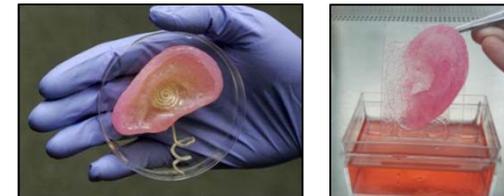
Creating human organs using 3D printing



Plaques de fixation internes et fracture



Chirurgie reconstructrice avec implants en titane



Prototype d'oreille artificielle - Puce électronique intégrée

Présentation de **Léa POURCHET** - 3d fab - Université Lyon 1
<http://fabric-advanced-biology.univ-lyon1.fr/>

La **FA**, cela peut être ceci.....ou bien....**ou encore....**

Aéronautique



Paroi d'Airbus A320 optimisée pour l'I3D



Moteurs LEAP-1A - L'Airbus A320neo
32 000 aubes, 1 800 carters et 45 000 injecteurs / an en I3D

Bâtiments



Pont d'acier imprimé en 3D à Amsterdam



I3D de bâtiments disponibles à la vente d'ici 2 ans



Véhicules imprimés en 3D

<https://www.3dnatives.com/top-12-des-vehicules-imprimés-en-3d-02022017/>



Mini Bus 12 places. Procédé I3D



Véhicule hybride électrique. Tout en I3D (ABS), à l'exception du châssis et du moteur



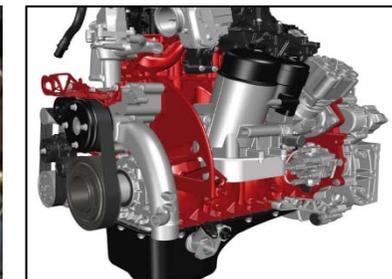
Ultra légère 35 kg - V : 80 km/h
Poids \searrow 30%



I3D mélange ABS-carbone
Poids divisé par 2



525 \rightarrow 120 kg - Moteur de Renault Trucks - 840 \rightarrow 640 pièces





Introduction

La FA au LAL

Valeurs ajoutées de la FA pour nos thématiques

Les procédés de FA métal

Prospective sur la FA métal pour les laboratoires de l'IN2P3

Objectifs du projet 3D Métal

Optimisation topologique

Les partenaires

Caractérisation d'échantillons

Réalisations possibles en FA

Conclusion

Les procédés les plus utilisés pour la **FA des polymères**

La stéréo lithographie (**SLA**: *Stereo Lithography Apparatus*)

Un laser ou un rayonnement ultraviolet solidifie une résine photosensible

Polymères, résines, composites céramiques-résines photosensibles

Le Frittage Sélectif par Laser (FSL) (**SLS** : *Selective Laser Sintering*)

Poudres frittées (chauffées et fusionnées) par un laser

Polymères (polyamide, polycarbonate, polystyrène, nylon, PEEK), composites (nylon-aluminium), métaux (aciers, titane, alliages)

Le dépôt de fil en fusion (**FDM** : *Fused Deposition Modeling*)

Dépôt d'une résine en fusion à travers une buse chauffée à haute température.

Polymères thermoplastiques : ABS, PLA (polymère bio dégradable), polycarbonate, nylon 12C

L'imprimante 3D Ultimaker²

En **2014**, acquisition d'une machine de **FA**. Cette machine de **début de gamme** a permis la réalisation de **nombreuses pièces** pour des spécialités et corps de **métiers très différents**. Elle nous a permis de **nous familiariser** avec l'utilisation de ce procédé.



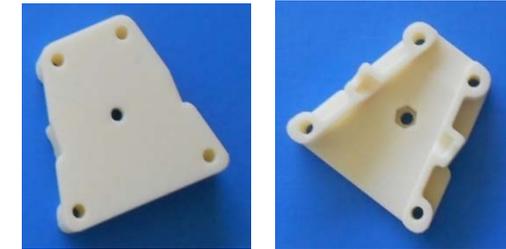
Imprimante 3D - Ultimaker²

Volume utile 230 x 225 x 205 mm

Achat 2015 : 2 k€

Absence d'enceinte thermo-régulée

- Tenue erratique de la pièce sur le plateau
- Déformation de la pièce pendant la fabrication
- Remplissage à 100% rarement possible
- Retrait important
- Volume de pièce possible très faible en particulier en Z
- Faible précision



Pièces réalisées au **LPNHE**

Matière pour le support et la pièce identique

- Tenue erratique de la pièce sur le plateau
- Parfois impossibilité de retirer le support sans rupture de la pièce



Pièce réalisée au **LAL**

Qualités mécaniques des matériaux médiocres

- Température trop basse pour la fusion d'autres matériaux



Pièce réalisée au **LAL**

L'imprimante 3D **Ultimaker²** ne répond pas à la **qualité**, à la **diversité** et au **volume des fabrications** nécessaires à notre laboratoire

Pour la seconde machine, nous avons les **critères** suivants :

La société choisie doit :

- assurer la mise en service et la formation du personnel
- garantir des prestations d'assistance et de maintenance à long terme

La machine et le procédé doivent avoir :

- une maturité suffisante
- une bonne résolution
- des capacités dimensionnelles correctes

Les pièces doivent être produites dans un matériau :

- connu
- précision acceptable
- répétabilité exacte
- bonne tenue dans le temps
- ne nécessitant que peu ou pas de post-traitement

La nouvelle machine doit répondre **aux besoins suivants** :

- validation d'idées
- augmenter les capacités d'innovation
- raccourcir le temps entre la pièce virtuelle et la pièce réelle et fonctionnelle
- prototypage rapide
- fabrication d'outillage à moindre coût
- outil de communication pour les projets en interne et en externe

Le 1er décembre 2015, le LAL a réceptionné la **FORTUS 250** de la marque **STRATASIS**



Technologie : **dépôt de fil en fusion**
(Fused Deposition Modeling)

Enceinte **régulée** en température

Matière : un polymère, l'**ABS**
(Acrylonitrile Butadiène Styène)

Volume utile : **254 x 254 x 305 mm³**

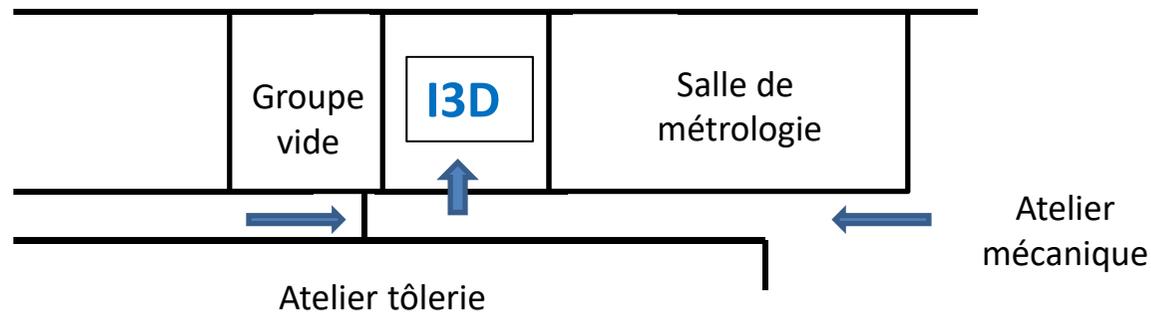
Epaisseur minimum de dépôt de fil : **178 µm**

Mise en place d'**inserts** en cours de réalisation
(écrous, vis, composants électroniques...)



Imprimante 3D : elle renforce les capacités et possibilités de l'atelier mécanique

Localisation : à proximité de l'atelier de réalisation mécanique au bât. 200



Machine en ligne avec accès restreint

Bureau d'études

- A. Blot
- S. Jenzer
- Y. Peinaud

Réalisation mécanique

- F. Gautier
- B. Leluan

Laserix

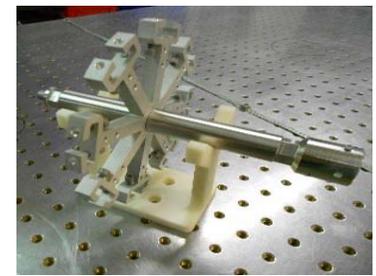
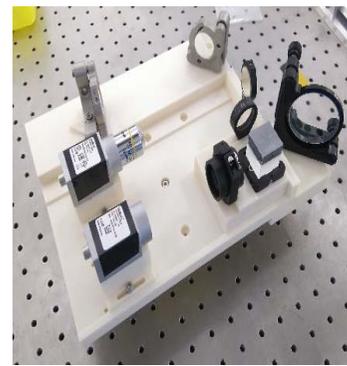
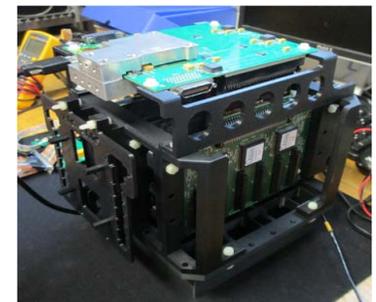
- J. Demailly



En 2 ans (de décembre 2015 à novembre 2017), nous avons cumulé **3 500 heures** de fonctionnement

8h de fonctionnement journalier

(année de 11 mois et 20 jours par mois)





Boitier électronique *Eli-Np*
5 h de fabrication – 12 €



Dispositif de calibration *SoLid*
26 h de fabrication - 13 pièces - 58 €

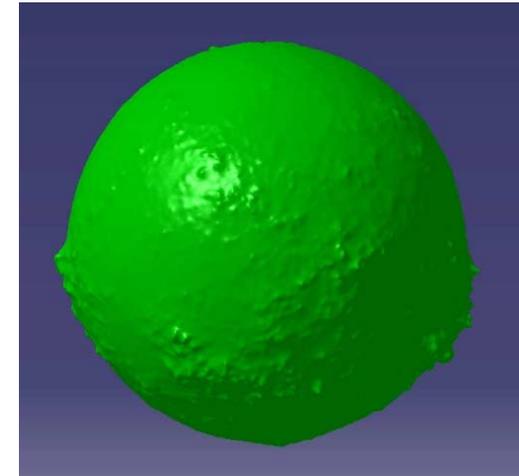


13 ensembles pyroélectrique de 3 pièces – *Etalon*
19 h de fabrication - 3 pièces – 28 €

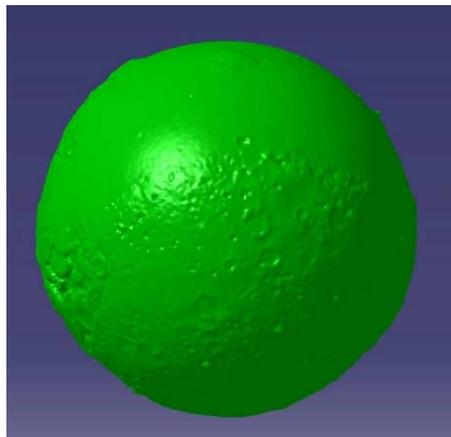


SCHMIDT Frédéric

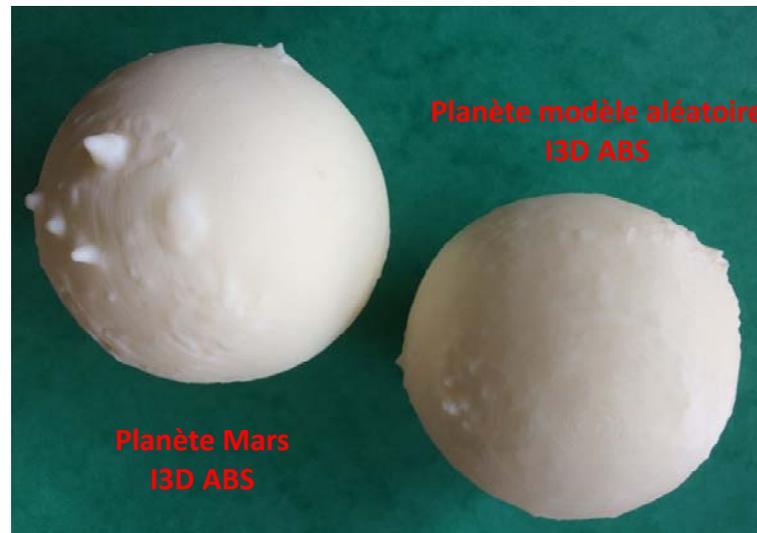
Planetary science, Mars, Remote sensing
Associate Professor, Université Paris Sud



Planète Mars – Fichier STL



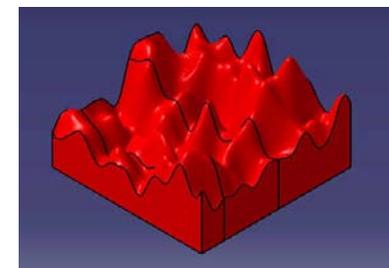
Planète modèle aléatoire
Fichier STL



Planète Mars
I3D ABS

Planète modèle aléatoire
I3D ABS

Test de réalisation en FA de deux planètes.
Sphères creuses de moins de 60 mm de rayon.



Portion de surface aléatoire
Nuage de points



Projet IN2P3 3D METAL



➤ 5 laboratoires



➤ 2 plateformes



➤ 3 services



➤ 15 projets





Introduction

La FA au LAL

Valeurs ajoutées de la FA pour nos thématiques

Les procédés de FA métal

Prospective sur la FA métal pour les laboratoires de l'IN2P3

Objectifs du projet 3D Métal

Optimisation topologique

Les partenaires

Caractérisation d'échantillons

Réalisations possibles en FA

Conclusion

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'ensembles complexes
- canaux de régulation thermique intégrés
- technologie du vide
 - électrons secondaires
 - diminution du nombre de brasures et de soudures

Astrophysique :

- optimisation des masses

Autres...



Introduction

La FA au LAL

Valeurs ajoutées de la FA pour nos thématiques

Les procédés de FA métal

Prospective sur la FA métal pour les laboratoires de l'IN2P3

Objectifs du projet 3D Métal

Optimisation topologique

Les partenaires

Caractérisation d'échantillons

Réalisations possibles 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, chrome-cobalt

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*)

Dépôt 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, chrome-cobalt

Machines à fusion des métaux

«Le futur» : centres d'usinage hybride

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

Ph. Repain
(LPNHE)

Technologies en émergences

LAAM (*Laser Aided Additive Manufacturing*)

Système CLAD avec un faisceau laser plus puissant

Grand volume de fabrication, vitesse d'impression 1kg de matière par heure

LMD-w (*Laser Métal Déposition - wire*)

Procédé LMD, mais avec du fil métallique au lieu de la poudre

Pièces de grande dimensions - Contrôle du dépôt et des propriétés du matériau

H-WAAM (*Hybrid Wired Arc Additive Manufacturing*)

Semblable au procédé WAAM. Dépôt de filaments métalliques fondus par torche plasma.

10 fois plus rapide - Pièce de plus d'1,5 mètre - Matière 5 fois moins chère / poudres métalliques.

RAF (*Rapid Additive Forging*)

La technologie RAF est proche de la technologie WAAM

Sous atmosphère inerte; contrôle de l'oxydation - Absence de porosité - Tenue mécanique supérieure aux technologies SLM ou EBM.

Machine à poudre avec liant

Dépôt de filaments plastiques chargés en métal.

Frittage dans un four micro-onde haute puissance 1400° pour éliminer le liant jusqu'à 98 % de densité.

Etc...



Technologie 3D Metal Forge



Technologie Prodways



Technologie Desktop Métal

Prospective sur la **FA métal** pour les laboratoires de l'IN2P3



10 laboratoires :

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

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, P. Repain, S. Roni, M. Roy, L. Vatrinet

4 spécialités :

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





Introduction

La FA au LAL

Valeurs ajoutées de la FA pour nos thématiques

Les procédés de FA métal

Prospective sur la FA métal pour les laboratoires de l'IN2P3

Objectifs du projet 3D Métal

Optimisation topologique

Les partenaires

Caractérisation d'échantillons

Réalisations possibles en FA

Conclusion

Objectifs du projet 3D Métal

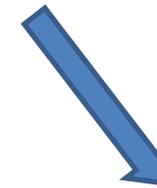
Démontrer l'utilité de la FA métal pour nos laboratoires



à nos bureaux
d'études



à nos principaux
demandeurs
les physiciens



à nos ateliers de
fabrication

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

La FA au LAL

Valeurs ajoutées de la FA pour nos thématiques

Les procédés de FA métal

Prospective sur la FA métal pour les laboratoires de l'IN2P3

Objectifs du projet 3D Métal

Optimisation topologique

Les partenaires

Caractérisation d'échantillons

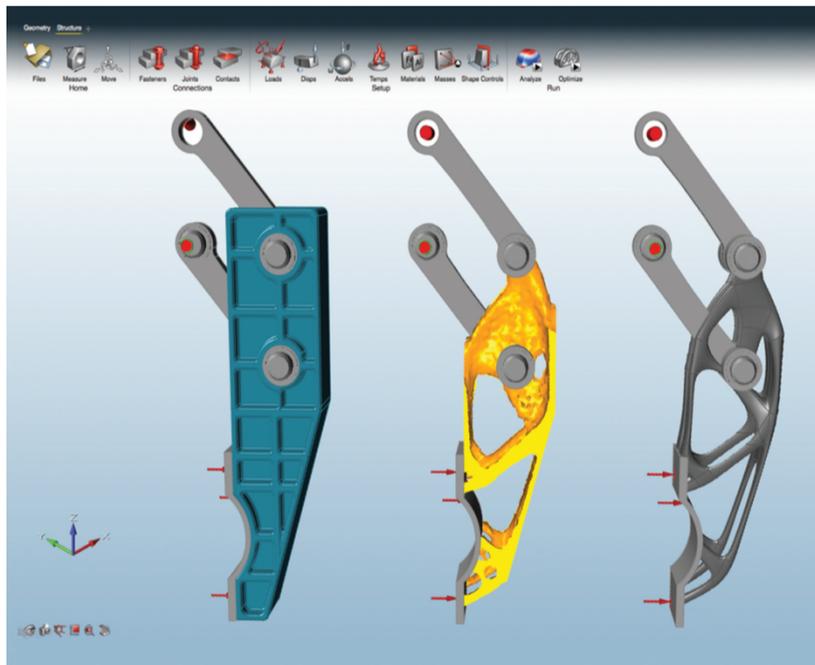
Réalisations possibles en FA

Conclusion

J. Bonis
(LAL)

L'optimisation topologique

L'optimisation topologique permet de produire des formes structurelles « idéales » en fonction des chargements appliqués.



Pièce initial

Résultat d'OT

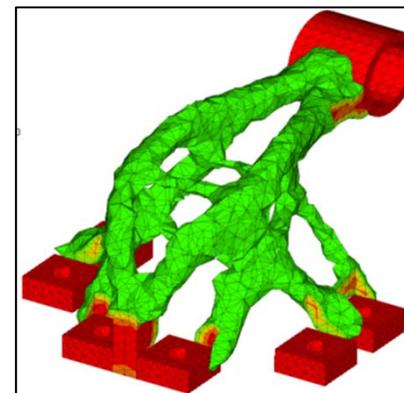
Interprétation
CAO de l'OT

Le résultat d'une OT est un nuage de faces non utilisable tel quel.

Les formes générées nécessitent la création de nouvelles CAO.

De part leurs complexités (forme organique....) l'utilisation des modeleurs usuels en mécanique peut-être difficile.

Recourt à des modeleurs issues du design (polynurbs, surfacique..).



Résultat d'OT (STL)



En test au LPSC J. Giraud
Le module d' OT d'ANSYS



En test au LAL J. Bonis
INSPIRE d'ALTAIR

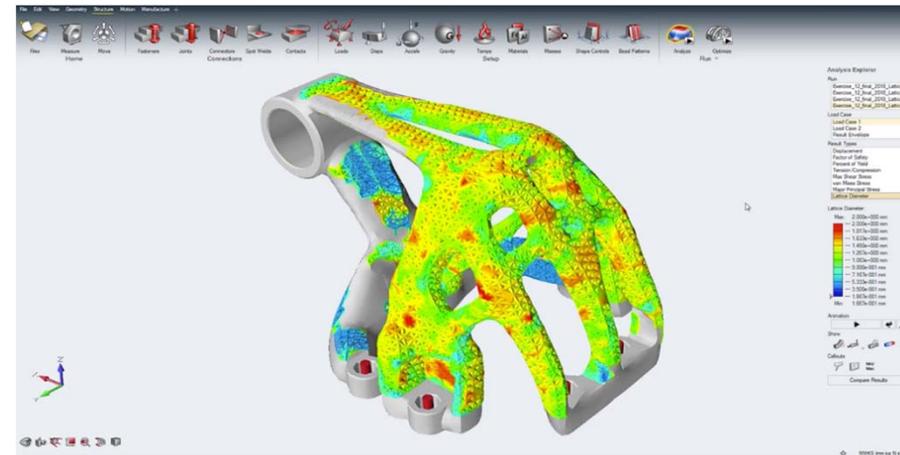
J. Bonis
(LAL)

L'optimisation topologique

Trouver la répartition de matière idéale dans un volume donné soumis à des efforts
Minimiser la masse ou maximiser la raideur



Géométrie organique issue d'OT



Certain Logiciel d'OT intègre les structures lattices

Selon logiciel :

Chargement : Efforts, inertiels, thermique, pré-tension de vis, déplacements imposés...

Analyse en flambement

Contraintes d'optimisation aux efforts de réactions

Associé à modeleur polynurbs





Introduction

La FA au LAL

Valeurs ajoutées de la FA pour nos thématiques

Les procédés de FA métal

Prospective sur la FA métal pour les laboratoires de l'IN2P3

Objectifs du projet 3D Métal

Optimisation topologique

Les partenaires

Caractérisation d'échantillons

Réalisations possibles 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 adossée à une structure de recherches : le **LERMPS-UTBM-PERSEE** qui conduit des travaux de recherches, entre autres, sur l'élaboration de poudres par atomisation.

Contrats de collaboration-recherche signés en septembre 2017

LMS de l'Ecole 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 entre DU en cours de rédaction

Location d'une machine SLM



HYPERION LASER
Z.A.C du Curtillet
39170 PRATZ

Location machine 8H par jour

- Poudre INOX 316L incluse
- Fourniture des énergies
- Mise à disposition d'un technicien
- Réservation maximum sur 2 jours consécutifs
- Mise à disposition de tout l'équipement nécessaire à la mise en œuvre de la machine

Coût journalier 350€



Machine à fusion des métaux EOS M280

Location d'une machine SLM

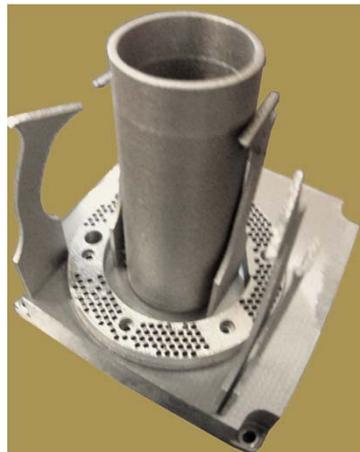


Retours d'expériences sur machine SLM – EOS

3 groupes de 2 personnes (Atelier - BE)
LPSC Grenoble, CPPM Marseille, SUBATECH Nantes et LAL Orsay

A venir 3 autres groupes
IPHC Strasbourg et LAL Orsay

Pour un total prévisionnel et budgété de 10 missions



Premier groupe



Deuxième groupe



Troisième groupe



Introduction

La FA au LAL

Valeurs ajoutées de la FA pour nos thématiques

Les procédés de FA métal

Prospective sur la FA métal pour les laboratoires de l'IN2P3

Objectifs du projet 3D Métal

Optimisation topologique

Les partenaires

Caractérisation d'échantillons

Réalisations possibles en FA

Conclusion

Caractéristiques matériaux

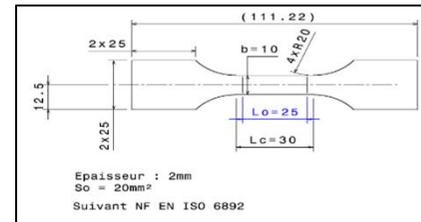
Comparer les caractéristiques d'éprouvettes réalisées en **FA** par **différents procédés**, avec des éprouvettes réalisées en **fabrication standard (FS)**

Matériaux

- Inox 316 L
- Titane TA6V

Procédés

- SLM
- EBM
- CLAD
- FS



Eprouvette de traction normalisée



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

Fabrication

- Sous-traitant
- Sens de fabrication
- Types machines
- Programmes

Post-traitements

- Sans
- Thermiques
- Chimiques

Températures

- 293 K
- 77 K
- 4,2 K



Machine de traction
MTS-30M de 150 kN

Couche par couche ⇒ **anisotrope**

Caractéristiques matériaux - Analyses de surface

Caractérisation de surface de matériaux réalisés en FA par différents procédés

Groupe technologies vide et surfaces du LAL

S. Bilgen, B. Mercier, G. Sattonnay

Matériaux

Températures

➤ Inox 316 L

Procédés

Post-traitements

➤ 293 K

➤ Titane TA6V

➤ SLM

Fabrication

Caractéristiques

➤ Sans

➤ 77 K

➤ EBM

➤ Sous-traitant

➤ Microstructures

➤ Thermiques

➤ 4,2 K

➤ CLAD

➤ Sens de fabrication

➤ Densités

➤ Chimiques

➤ FS

➤ Types machines

➤ Compositions

➤ Programmes

➤ Rugosités



Echantillon brut



Echantillon poli

Outils de caractérisation et mise en œuvre :



➤ Plateforme PANAMA

➤ Polytech Paris-Sud



Caractéristiques matériaux - Analyses de surface

Caractérisation de surface de matériaux réalisés en FA par différents procédés

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

Méthode d'Archimède	Microscope Confocal	Microscope Electronique à Balayage (MEB)	Dureté Vickers	SIMS*	Diffractomètre*
Densité réelle	Analyse de la surface (structure)	Composition chimique	Micro et Macro duretés. Force d'essai de 3N et 1840N	Composition chimique	Analyse cristalline
	Rugosité	Distribution spatiale des éléments		Rugosité	Microstructure

* Mesures à venir

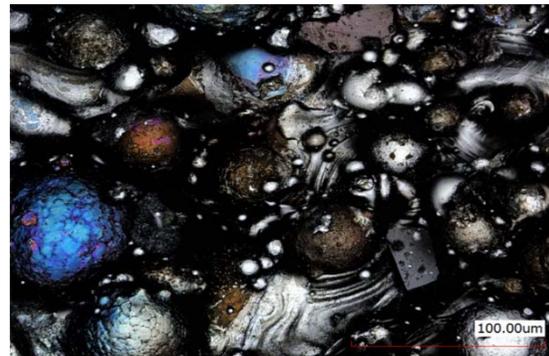
Microscope confocal : rugosité locale

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

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

BV Proto - Machine : EOS M280 - Procédé SLM
Programme maison – Ep. couches : 40 µm

Mesures à faire



Microscope confocal - Grossissement x50

Rugosité locale Ra = $24 \pm 5 \mu\text{m}$
sur une zone de quelques mm²

Caractéristiques matériaux - Analyses de surface

Caractérisation de surface de matériaux réalisés en FA par différents procédés

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

BV Proto - Machine : EOS M280
Procédé SLM
Programme maison
Ep. couches : 40 µm

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

Inox 316L standard

Mesures de densité par la méthode d'Archimède

Densité : **7.86** ± 0.05 g.cm³
(Moyenne sur 2 échantillons)

Densité : **7.58** ± 0.05 g.cm³
(Moyenne sur 2 échantillons)

Densité théorique : **7.96** g.cm³



Mesure de densité

Essais de dureté

Macro-duromètre – Vickers

220 ± 10 HV

224 ± 10 HV

Micro-duromètre – Vickers

219 ± 10 HV

231 ± 10 HV

La dureté d'un inox 316L standard varie de :

200 HV (recuit)

à

400 HV (écroui)

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

Caractéristiques matériaux - Analyses de surface

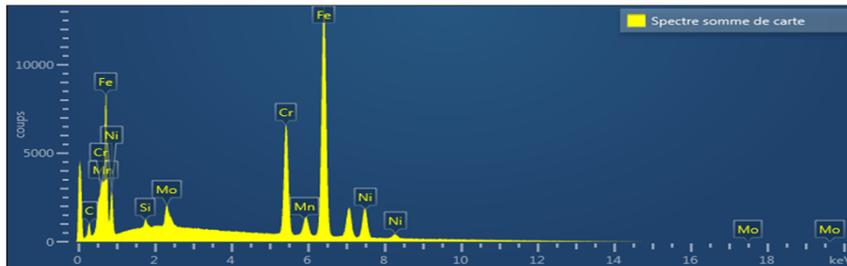
Caractérisation de surface de matériaux réalisés en FA par différents procédés

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

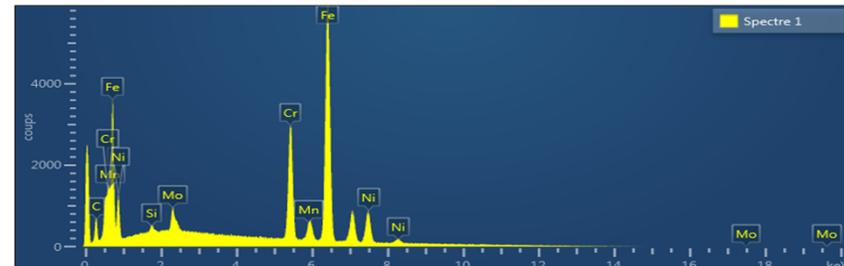
AGS Fusion – Machine : Solution 280 H - Procédé SLM
Programme constructeur – Ep. couches : 20 µm

BV Proto - Machine : EOS M280 - Procédé SLM
Programme maison – Ep. couches : 40 µm

Analyse chimique - MEB-EDX



Eléments	Cr	Ni	Fe	Mo	Si	Mn
%massique	17,8	14,6	62,8	2,9	0,3	1,6



Eléments	Cr	Ni	Fe	Mo	Si	Mn
%massique	17,7	13,7	63,0	2,8	0,4	1,3

La composition s'apparente à un 316L standard

Les échantillons sont homogènes dans leur composition

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

Caractéristiques matériaux - Analyses de surface

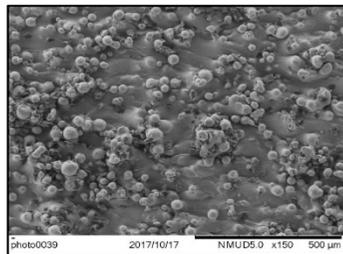
Caractérisation de surface de matériaux réalisés en FA par différents procédés

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

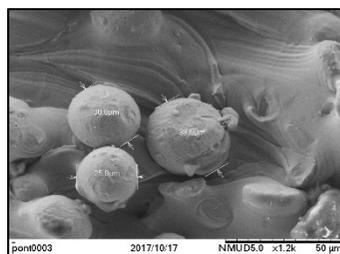
AGS Fusion – Machine : Solution 280 H - Procédé SLM
Programme constructeur – Ep. couches : 20 μm

BV Proto - Machine : EOS M280 - Procédé SLM
Programme maison – Ep. couches : 40 μm

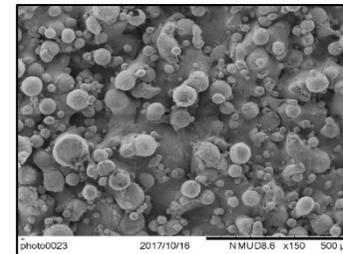
Images de la surface brute – MEB



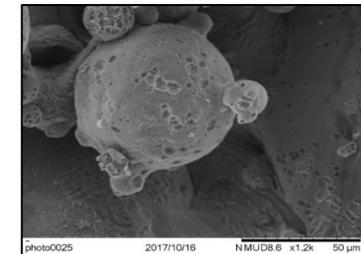
MEB - échelle 500 μm



MEB - échelle 50 μm

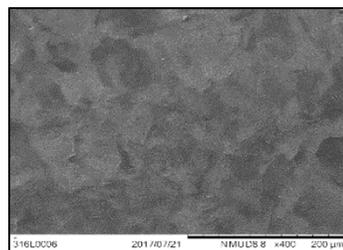


MEB - échelle 500 μm

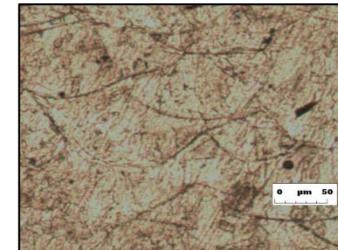
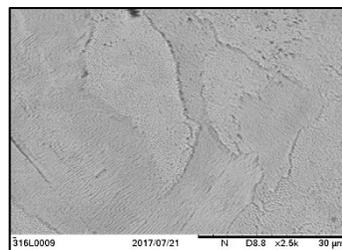


MEB - échelle 50 μm

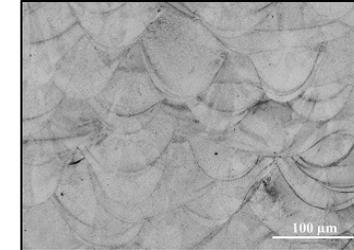
Analyse microstructure – MEB/microscopie optique après polissage



Microstructure **en grains**, taille $\approx 50 \mu\text{m}$



Microstructure **en écailles**, taille $\approx 150 \mu\text{m}$



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

Tenue au vide et fabrication additive

Comparer la **tenue au vide** de tubes à **embout KF et CF** réalisés en **FA** par **différents procédés** avec des tubes de géométrie identique réalisés en **fabrication standard (FS)**

Groupe technologies vide et surfaces du LAL

S. Bilgen, M. Alves, D. Grasset, F. Letellier, B. Mercier, É. Mistretta

Matériaux

- Inoxy 316 L
- Titane TA6V

Procédés

- SLM
- EBM
- CLAD
- FS

Partenaires

- BV Proto
- AGS Fusion
- L. M. S.
- Gi Nova Primeca
- OPT'ALM
-

Tubes

- KF en FA
- KF en FS
- CF en FA
- CF en FS

Etanchéité

- Viton
- Aluminium
- Cuivre



Tube à embouts CF



Tube à embouts KF

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

- **Joint**s Viton
- Brut de FA
- 2 sociétés
- Embouts 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

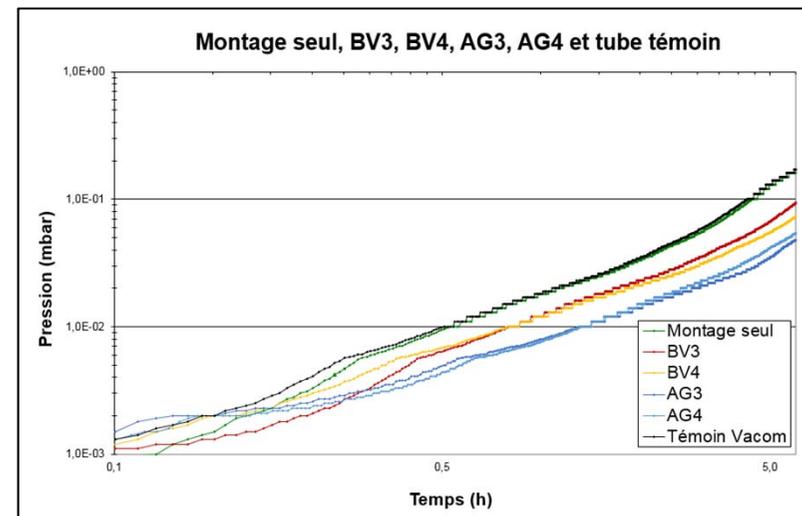


Tubes à embouts KF

- 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>

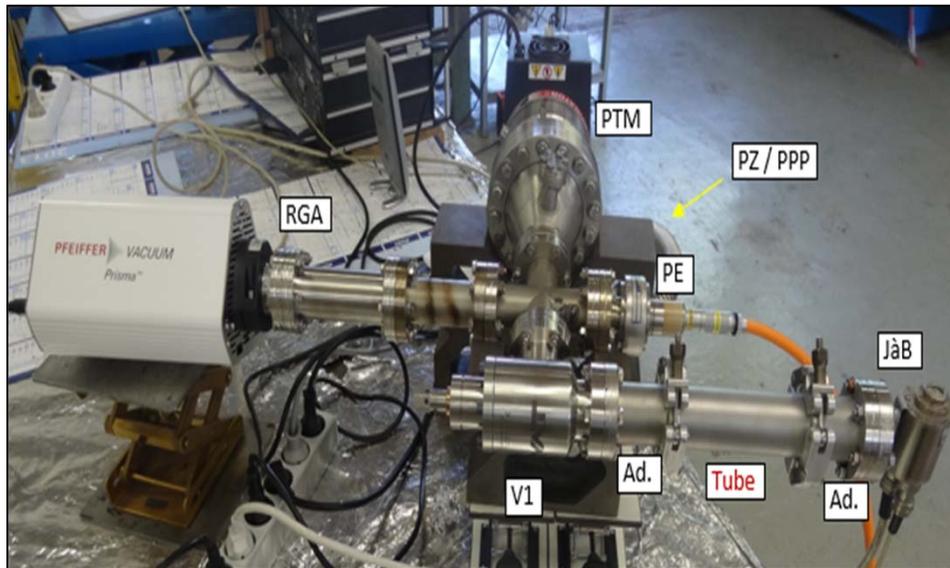


Courbes de remontée de pression

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



Montage de mesure du taux de dégazage



Tubes à embouts KF

- **Joint Aluminium**
- Brut de FA
- 2 sociétés

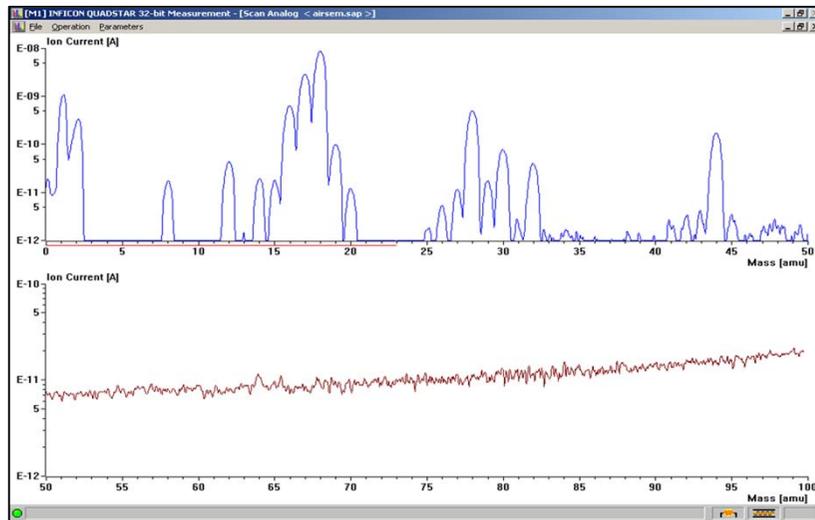
- Embouts KF
- Inox 316 L
- Procédé SLM

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

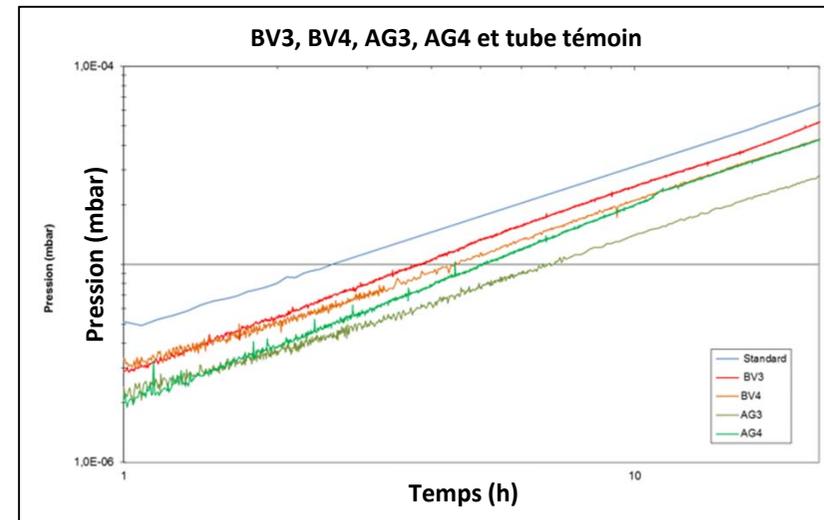
Groupe technologies vide et surfaces du LAL : **M. Alves, S. Bilgen, D. Grasset, F. Letellier, B. Mercier, É. Mistretta, G. Sattonnay**

Tenue au vide et fabrication additive

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



Spectres de masse



Courbes de remontée de pression

- 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**

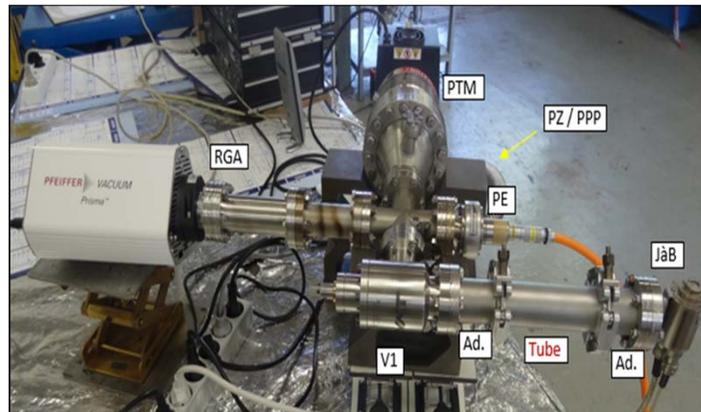
Groupe technologies vide et surfaces du LAL : **M. Alves, S. Bilgen, D. Grasset, F. Letellier, B. Mercier, É. Mistretta, G. Sattonnay**

Tenue au vide et fabrication additive

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

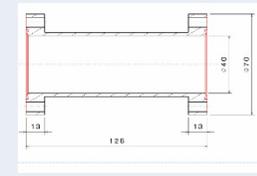
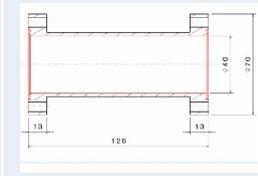
Perspectives et évolutions

- Améliorations de la mesure du taux de dégazage :
ajout **vanne**, stabilisation des conditions, mesures sur 2 tubes (brides CF)



Montage de mesure du taux de dégazage

- Tests d'étanchéité et mesures avec tubes en **brides CF** (BV Proto)
- Tests d'étanchéité et mesures de tubes en 316L réalisés par **procédé CLAD**
- Tests d'étanchéité et mesures de tubes en **TA6V** réalisés par **procédé EBM**
- ...

BV5	BV6
Usinage des portées de joints et surface interne brut de FA	Usinage des portées de joints et de la surface interne
Bride DN40CF	Bride DN40CF
Joint cuivre	Joint cuivre
	

2 tubes de chaque

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



Introduction

La FA au LAL

Valeurs ajoutées de la FA pour nos thématiques

Les procédés de FA métal

Prospective sur la FA métal pour les laboratoires de l'IN2P3

Objectifs du projet 3D Métal

Optimisation topologique

Les partenaires

Caractérisation d'échantillons

Réalisations possibles en FA

Conclusion

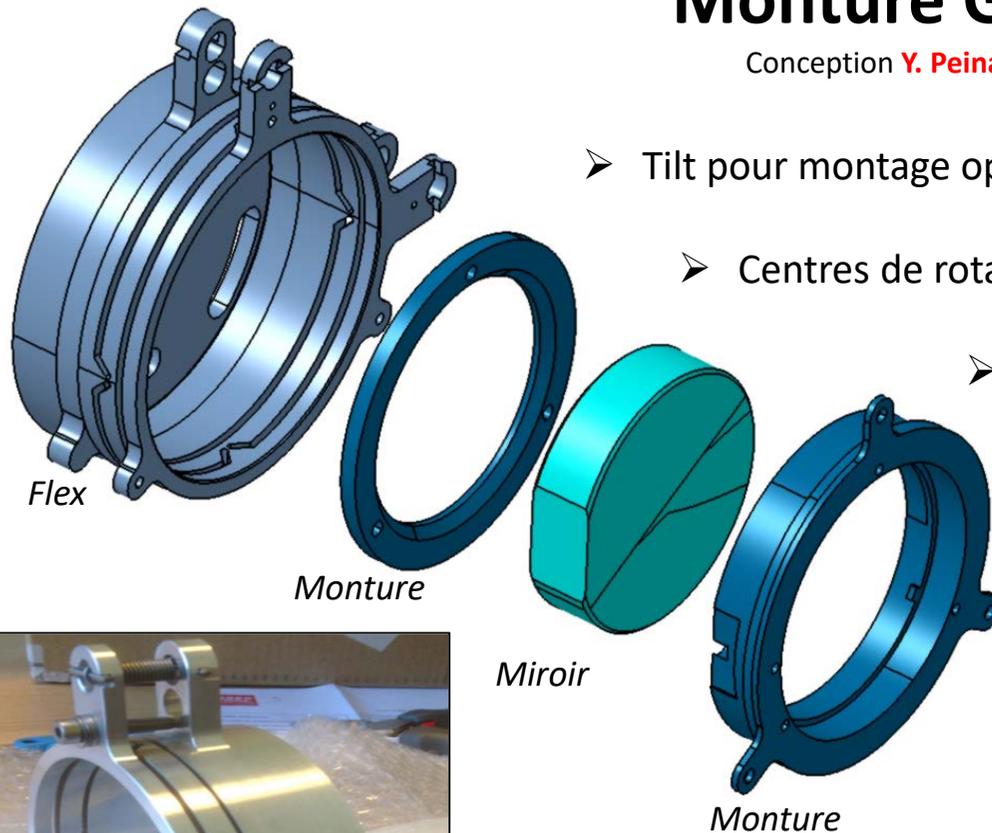
Monture Gimbal

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 petites dimensions
Ø 34 mm, ép. 10 mm



Montures Gimbal- Ø 98 mm, ép. 43 mm

Ensemble Gimbal

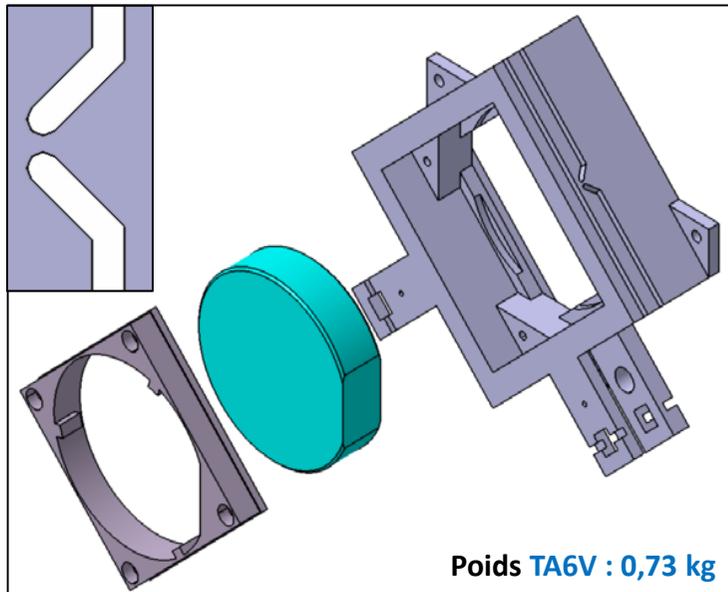
Ø 98 mm, ép. 43 mm

Poids TA6V : 0,76 kg

Poids montures 316-L : 1,33 kg

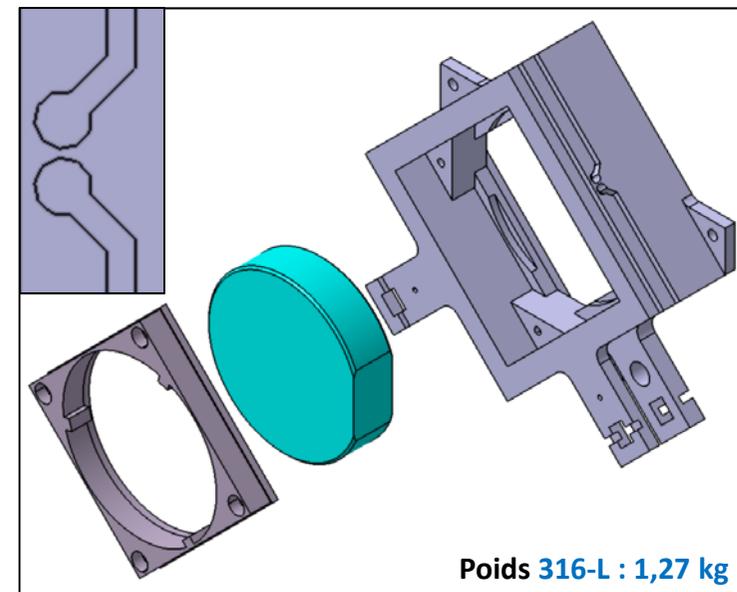
Monture Gimbal

Conception pour **FA A. Gonnin** (LAL)



Poids TA6V : 0,73 kg

Procédé **EBM** – Matière **TA6V**



Poids 316-L : 1,27 kg

Procédé **SLM** – Matière **316-L**

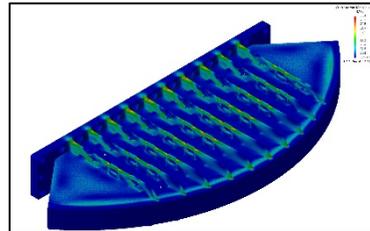
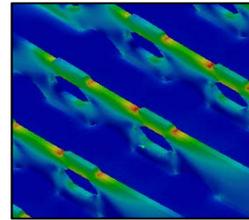
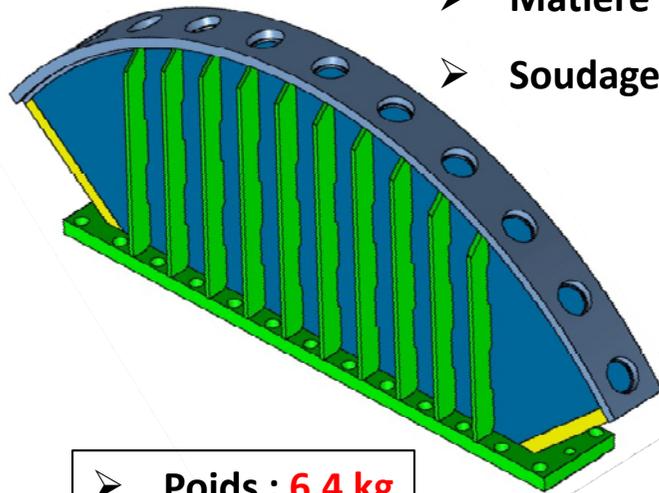
- Diminution du nombre de composants
- Faible diminution du poids $\approx 4\%$
- Diminution des coûts et du temps de fabrication
- Montures de très petites dimensions
- Problème de l'état de surface
- Travail en fatigue

Structure pour chambre à vide

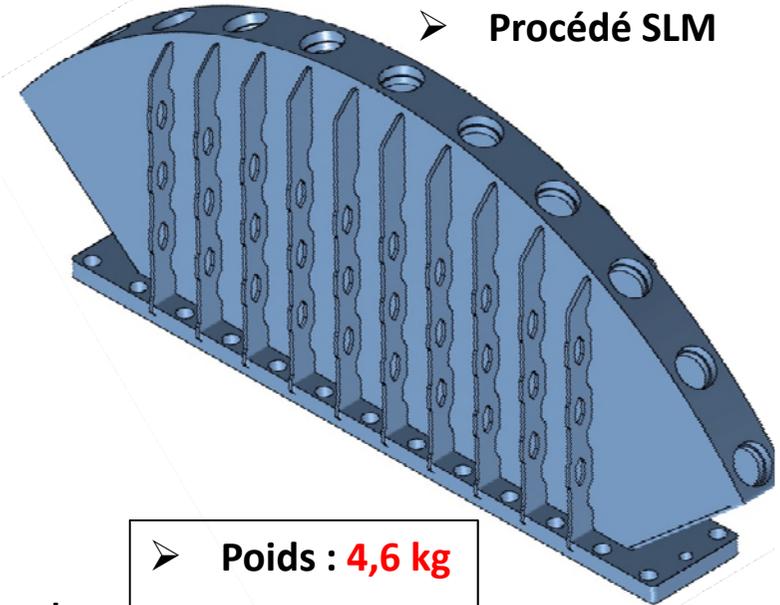
Conceptions et calculs **A. Migayron** (LAL)

- Matière **316-L**
- Procédé SLM

- Matière **304-L**
- Soudage



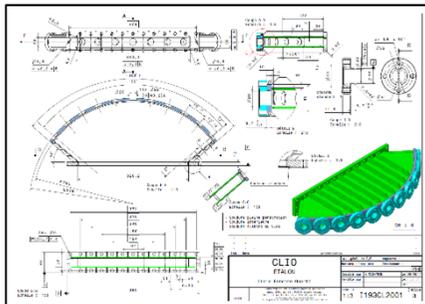
Calcul EF ANALYSIS



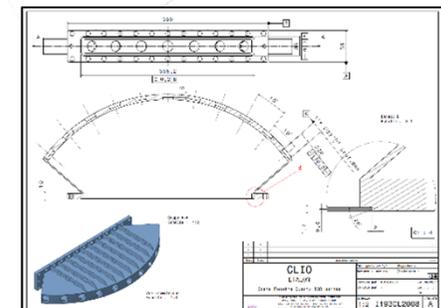
- Poids : **6,4 kg**
- **26 pièces**

- Poids : **4,6 kg**
- **1 pièce**

- Diminution du nombre de composants
- Diminution du poids de 1/3
- Diminution du temps de fabrication
- Diminution du temps de conception
- Pièce plus précise : absence de soudures
- **Retrait des supports**
- **Problème de l'état de surface**



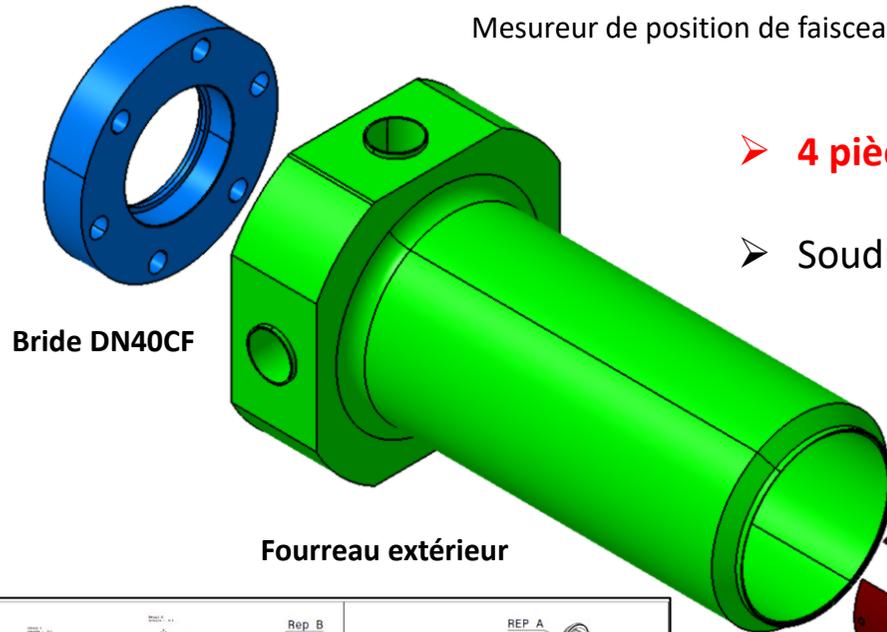
Plan de fabrication BPM



Plan de reprise après fabrication additive

Beam Position Monitor stripline

Mesureur de position de faisceau BE LAL pour ThomX : **D. Auguste** (LAL)



Bride DN40CF

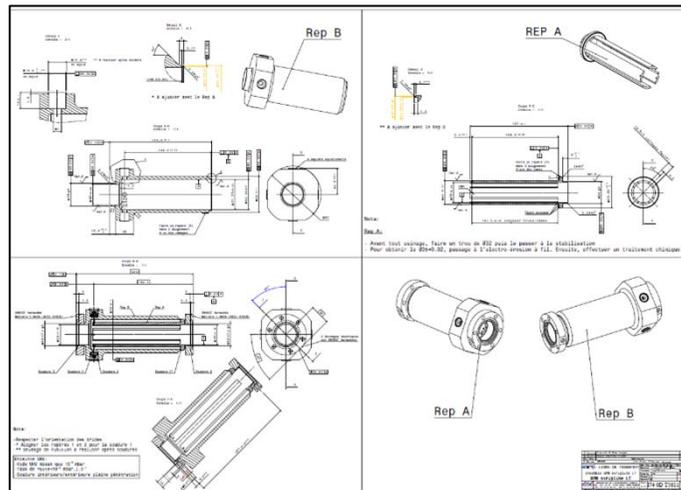
Fourreau extérieur

➤ 4 pièces

➤ Soudures



Ecorché BPM réalisation atelier du LAL



Plan de fabrication BPM

Fourreau intérieur

➤ Poids : 2,9 kg

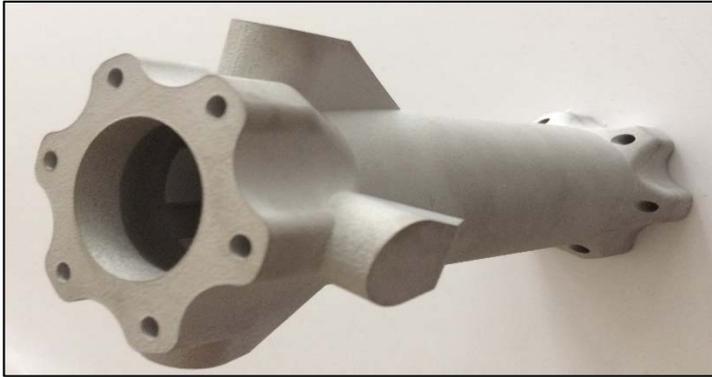
➤ Prix : ???? €

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

Bride DN40CF

Beam Position Monitor stripline

Calculs et optimisation topologique J. Bonis (LAL) - Reprises d'usinages F. Gauthier et E. Guerard (LAL)



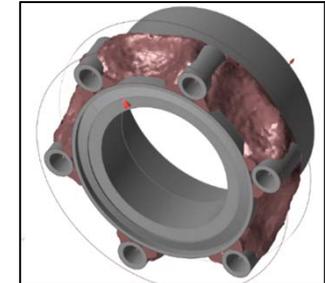
BPM réalisé par fabrication additive BV Proto

➤ Poids : 1,2 kg

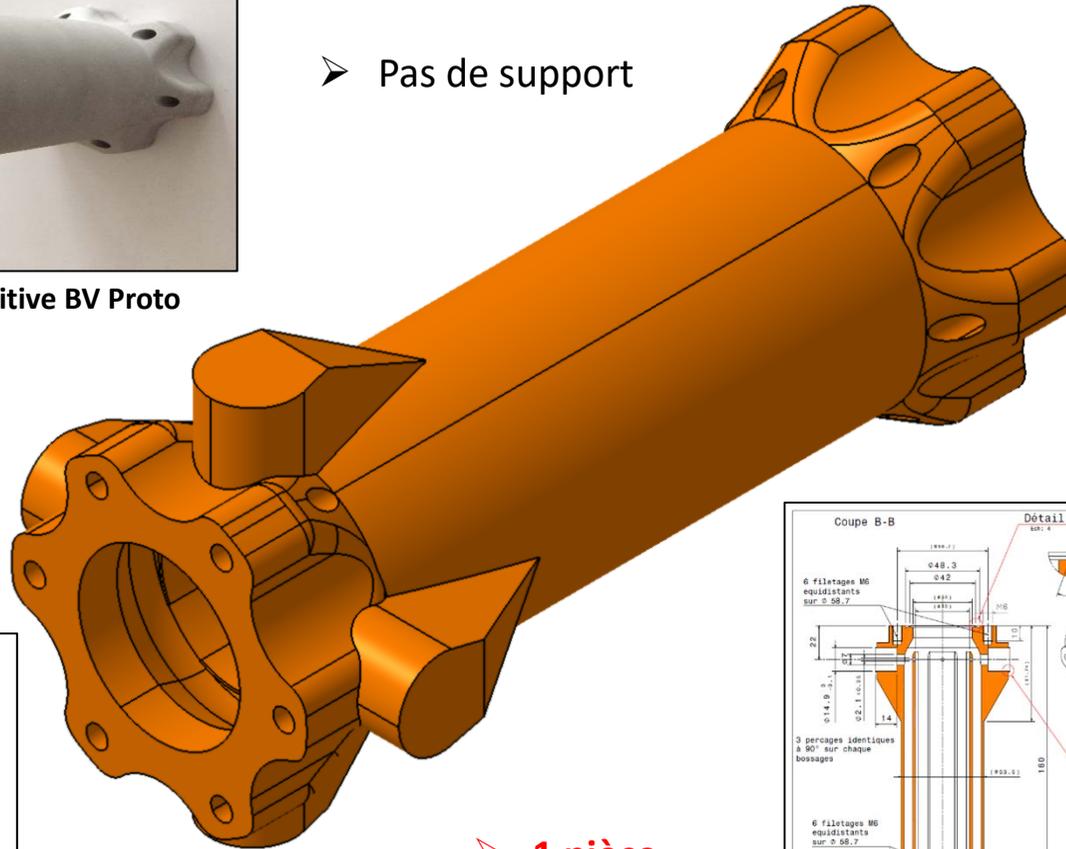
➤ Prix : 2730 €

- Conception pour la FA
- Pas de support

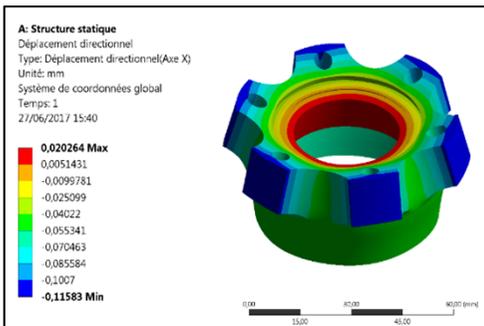
Optimisation topologique



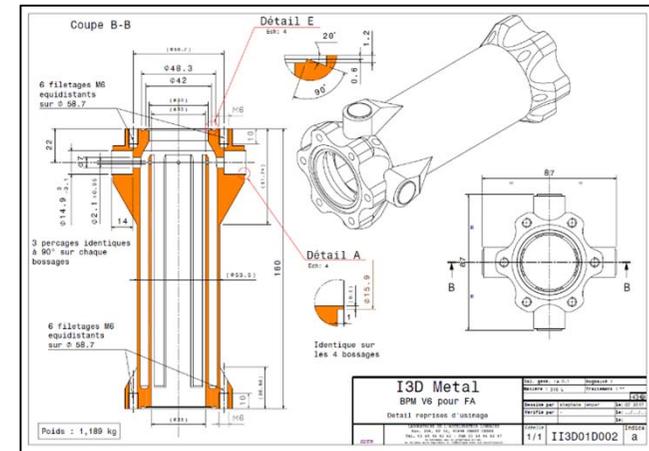
INSPIRE d'ALTAIR



➤ 1 pièce



Calcul éléments finis ANSYS



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 coût**
- **Diminution du nombre de composants**
 - De 4 pièces à 1 pièce
- **Diminution du poids de 2/3**
- **Diminution de l'encombrement de 20 mm**
 - De 200 à 180 mm pour des lames de longueurs identiques
- **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)**

Article publié dans le "Journal of Physics" <http://ipac2018.vrws.de/papers/thpal016.pdf>

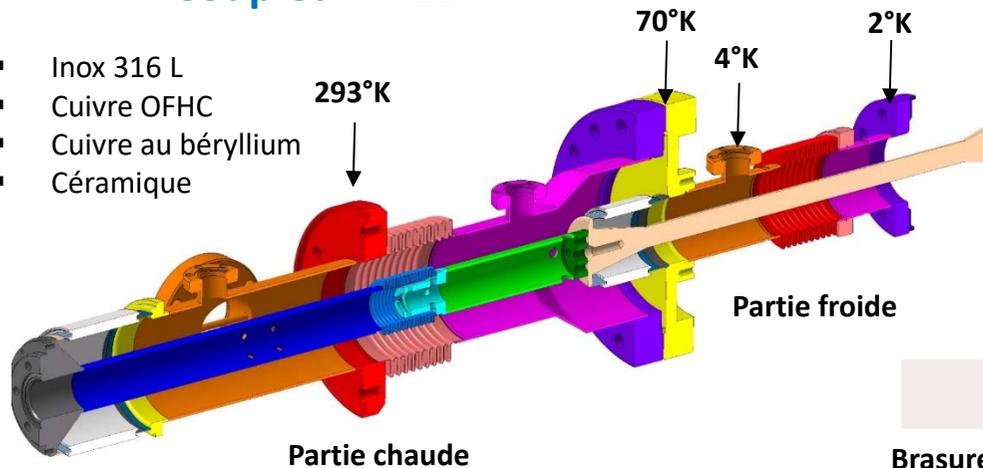
Auteurs : S. Jenzer¹, D. Auguste¹, J. Bonis¹, N. Delerue¹, F. Gautier¹, A. Gonnin¹, O. Trofimiuk¹ and A. Vion². (1 : LAL - 2 : BV Proto)

Coupleurs de puissance HF

pour cavités supraconductrices

Coupleur XFEL

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

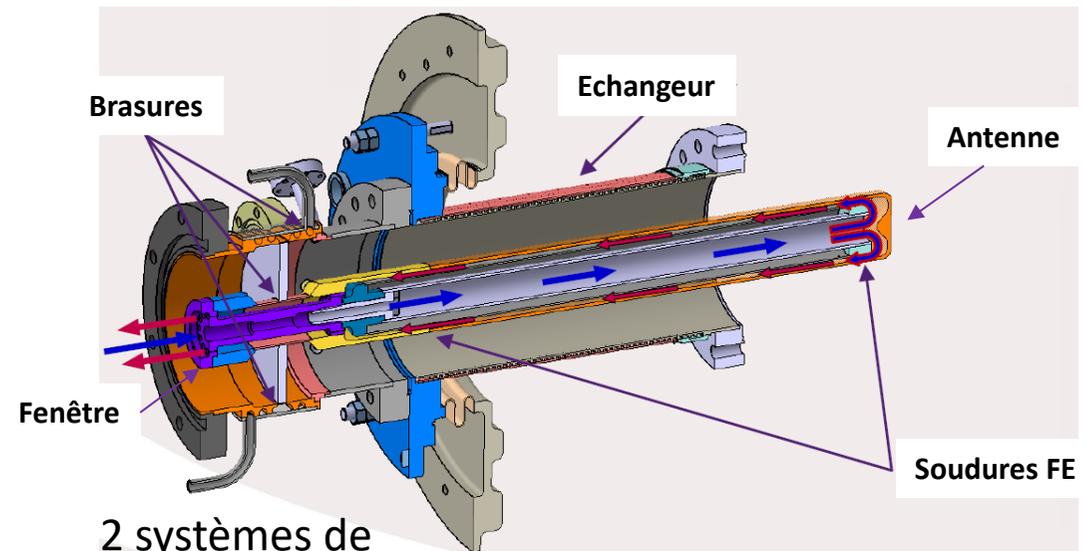


- Cryogénie
- HF
- Vide 10^{-9} mbar
- Brasures
- Flash nickel
- Dépôts de cuivre



Alliage bronze sur inox standard

Coupleur ESS 352 MHz



2 systèmes de refroidissement :

- fenêtre
- antenne (double enceinte)

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

Productions scientifiques

- Study of the suitability of 3D printing for UHV applications - 2017
Journal of Physics : <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/874/1/012097>
- Study of the performances of a 3D printed BPM – 2018
Journal of Physics : <http://ipac2018.vrws.de/papers/thpal016.pdf>
- **Articles en préparation** : FA et technologie du vide - 2018
Caractérisation de matériaux en **FA** - 2018
- **ANF** : Conception mécanique orientée vers l'impression 3D
en **octobre 2018** à Toulouse
- **Rapport final** sur le projet 3D Métal en **décembre 2018**



Introduction

La FA au LAL

Valeurs ajoutées de la FA pour nos thématiques

Les procédés de FA métal

Prospective sur la FA métal pour les laboratoires de l'IN2P3

Objectifs du projet 3D Métal

Optimisation topologique

Les partenaires

Caractérisation d'échantillons

Réalisations possibles en FA

Conclusion

Conclusion

➤ Petites séries, pièces complexes, ↘ nbr de pièces , ↘ délais de fabrication

➤ Pas de corrélation → complexité / prix

➤ Anisotrope, retraits → contraintes/traitements thermiques

➤ Supports, rugosité → états de surface/post-traitements

➤ Reproductibilité → procédés, sens de fabrication, machines, programmes....

➤ H&S

➤ Nouvelle conception - Ne remplace pas la fabrication soustractive mais la complète

➤ Poudres → nouveaux matériaux

➤ Pièces multi matériaux

➤ FA du cuivre

➤ 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), D. Longuevergne (IPNO), P. Marie (LMS), G. Mercadier (LAL), B. Mercier (LAL), A. Migayron (LAL), E. Mistretta (LAL), C. Olivetto (IN2P3), Y. Peinaud (LAL), F. Peltier (LAPP), A. Poizat (C2N), C. Prevost (LAL), P. 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 !