



# Fabrication Additive au sein de l'ICB

## *De la poudre à la pièce*

Ludovic VITU

Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne  
ICB UMR CNRS 6303  
[icb.u-bourgogne.fr](http://icb.u-bourgogne.fr)



1

## Sommaire

1. Présentation du laboratoire ICB
2. Fabrication de la poudre
3. La fabrication additive par projection thermique et SLM
4. Quelques exemples de développement en cours
5. Conclusion



2

2

# Historique

➤ 1987 : Création sur le site de Sevenans du laboratoire LERMPS qui deviendra équipe d'Accueil reconnue par le MNESR



➤ 2012 : Intégration de l'équipe dans l'institut IRTES EA 7275



➤ 2017 : Rattachement au laboratoire Interdisciplinaire Carnot Bourgogne UMR CNRS 6303

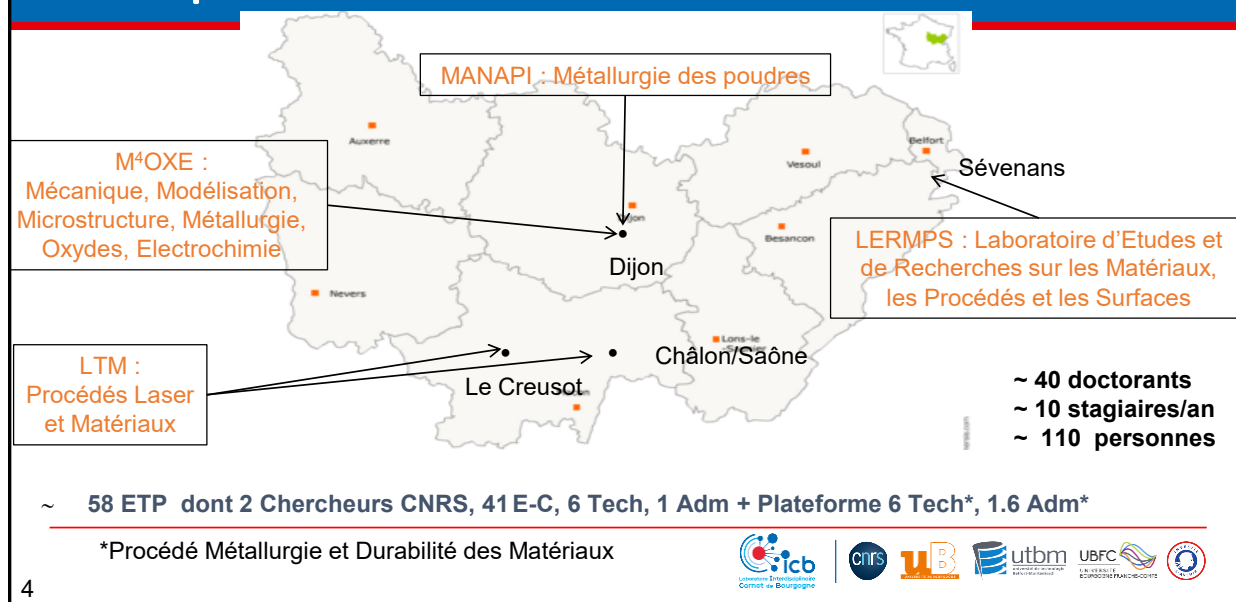


3



3

# Le département ICB-PMDM

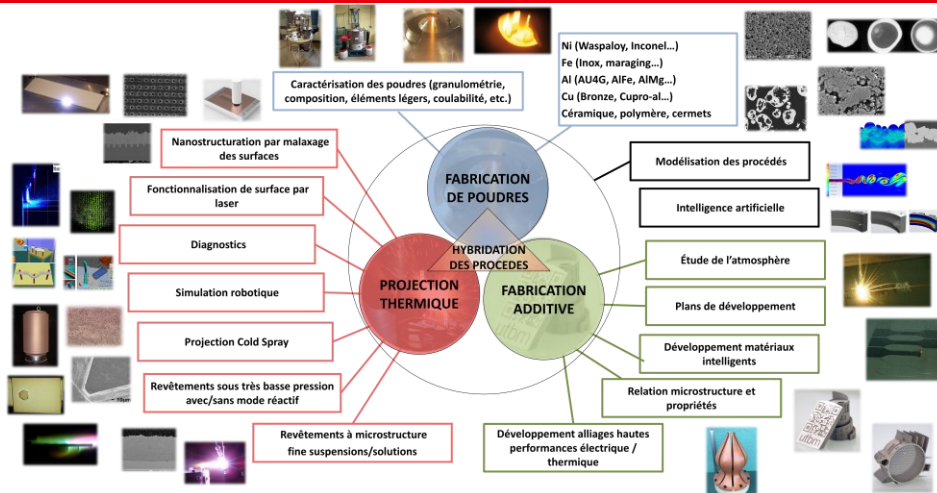


4



4

# Nos outils



5

5



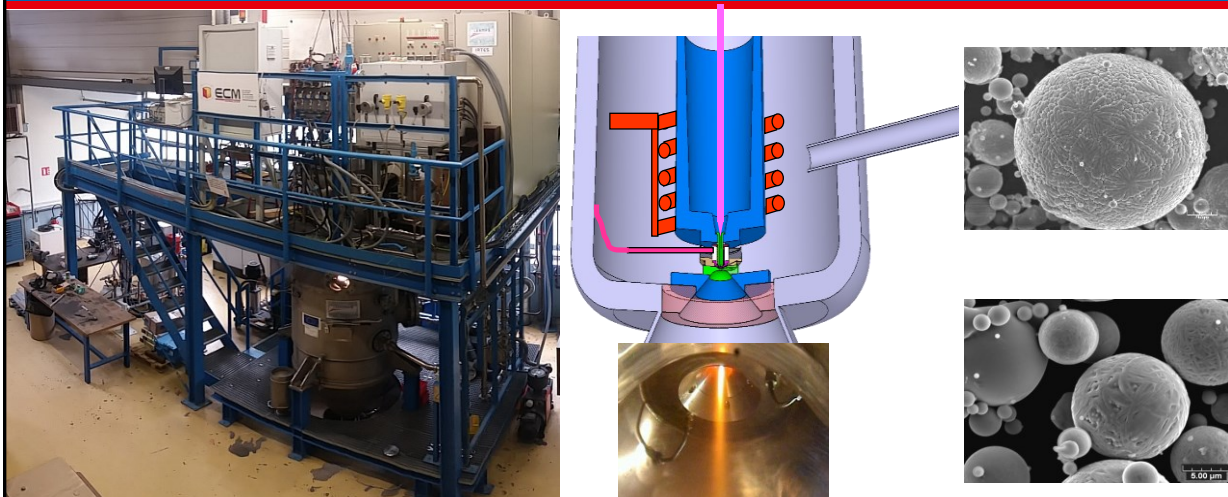
# Fabrication de poudres

6

6



# Notre tour d'atomisation



7

Contact : yoann.danlos@utbm.fr



7

# Elaboration de la poudre

## ▶ Atomisation de matériaux métalliques

$$T_{\text{fusion}} < 1500^{\circ} \text{ C}$$

Dans creuset Graphite

- Magnésium
- Aluminium
- Cuivre

Dans creuset Céramique

- Fer
- Nickel
- Cobalt

## ▶ Sous atmosphère contrôlée (argon)

## ▶ Entre 1L et 8L [10 kg d'aluminium / 40 kg d'acier]

8

Contact : yoann.danlos@utbm.fr



8

# Elaboration poudre

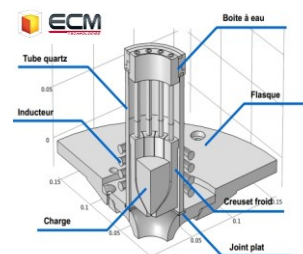
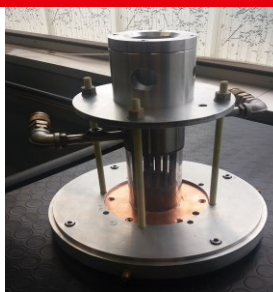
## ➤ Creuset froid

$$T_{\text{fusion}} > 2000^{\circ} \text{ C}$$

## ➤ Atomisation sans contact

## ➤ Alliages réactifs

- Ti Nb
- Ni Ti Hf



9

Contact : yoann.danlos@utbm.fr



9

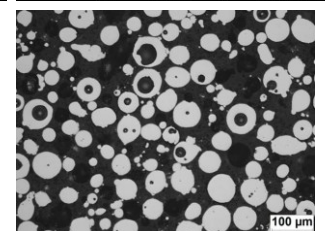
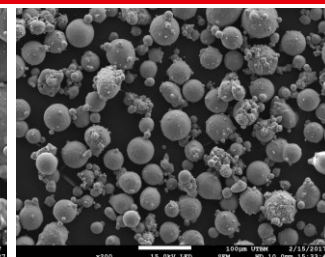
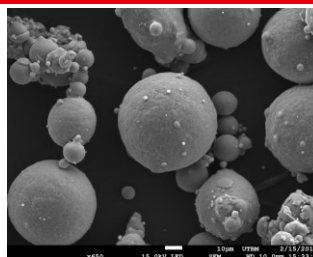
# Réalisation de poudre : les restrictions

## ➤ Présence de satellites

## ➤ Diamètre particules < 125 µm

## ➤ Pas de bases Titane (réactivité avec creuset)

## ➤ Porosité diamètre > 45 µm (base Fer/Nickel)



10

Contact : yoann.danlos@utbm.fr



10

# Moyens de caractérisation

- ▶ Granulomètre par diffraction LASER (Malvern MASTERSIZER 2000)
- ▶ Mesure de densité apparente – densité tassée
- ▶ Test de coulabilité - Temps d'écoulement /angle de talus (Entonnoir de Hall)
  - Testeur d'écoulement de poudre (Brookfield) cellule de cisaillement



**ES** EQUIPEMENTS SCIENTIFIQUES S.A.  
100 rue de la République - 21000 Dijon - France  
 Tél : 03 80 39 39 39 - Fax : 03 80 39 39 40  
 www.es-science.com



Couvercle à ailettes Petit Volume  
 795-12,332 kPa  
 Couverture à ailettes Volume Standard  
 289-4,619 kPa

11

Contact : yoann.danlos@utbm.fr



11

Fabrication additive

12



12

# Equipements disponibles

## ➤ Procédés de fabrication additive

- Pièces de grande dimension
  - plasma atmosphérique (APS)
  - Projection à froid (Haute et Basse Pression)
- Pièces de petite dimension
  - Microfusion laser sur lit de poudre (L-PBF)
    - Laser IR, vert



13

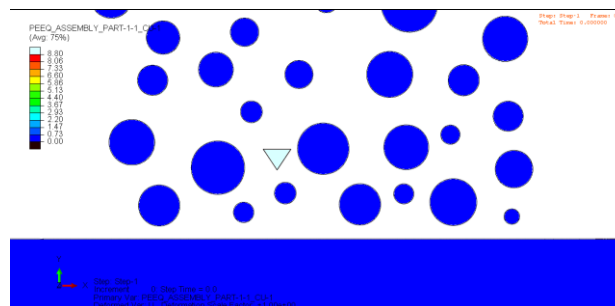
Contacts : [christophe.verdy@utbm.fr](mailto:christophe.verdy@utbm.fr) [ludovic.vitu@utbm.fr](mailto:ludovic.vitu@utbm.fr)



13

# Fabrication Additive des alliages de cuivre

- Cold spray sous Hélium recyclé
- FA de tubes pour la réalisation d'aimants de type polyhélices pour le LNCMI-Grenoble
- Alliages de Cu : CuCrZr, CuAg (rendement de 100%, densité de 99,9%)
- Débit 6 kg /h



(1 à 60  $\mu\text{m}$ , max : 50 bars, 1000°C)

14

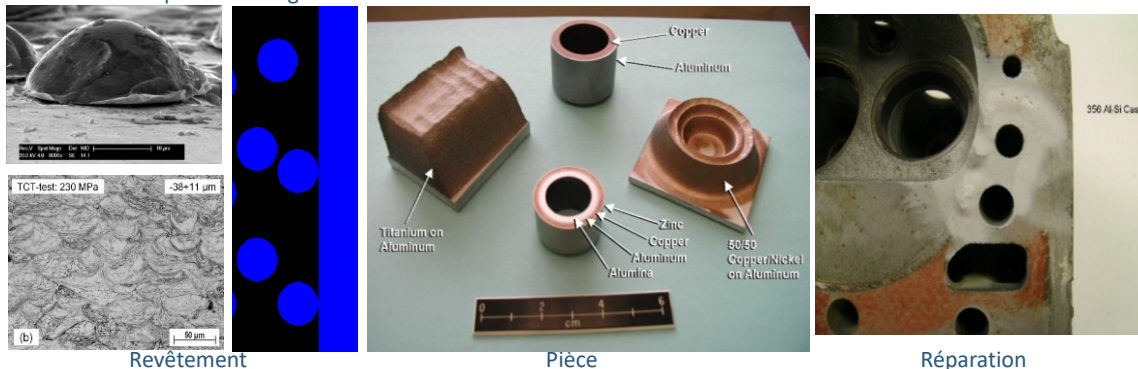
Contact : [christophe.verdy@utbm.fr](mailto:christophe.verdy@utbm.fr)



14

# Fabrication additive : Cold Spray

- ▶ Peu d'influence de la thermique (évite l'oxydation)
- ▶ Revêtement avec une microstructure dense et peu de porosités
- ▶ Induit de fortes contraintes de compression : le revêtement peu être très épais
- ▶ Haut rendement pour les alliages de cuivre

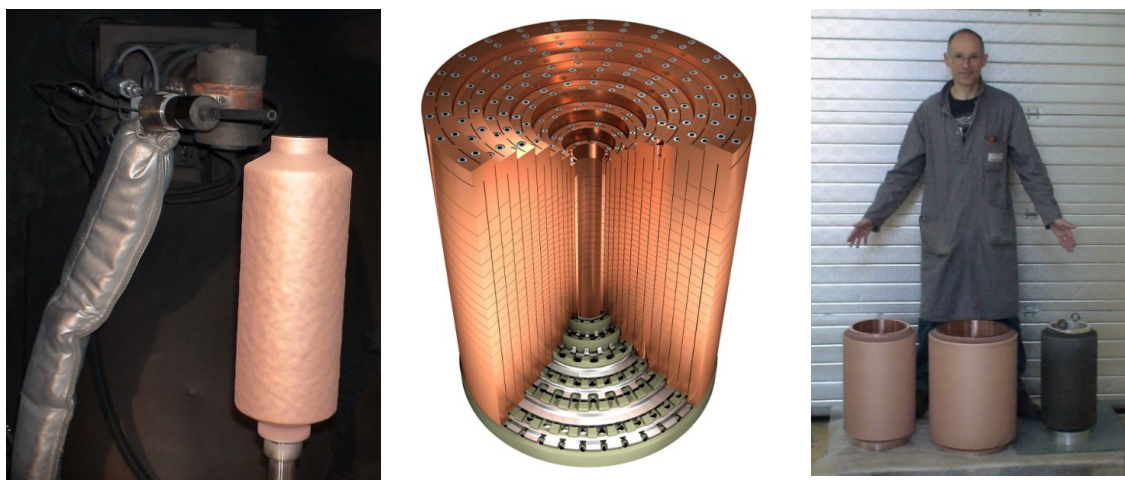


15

15



# Fabrication Additive des alliages de cuivre



16

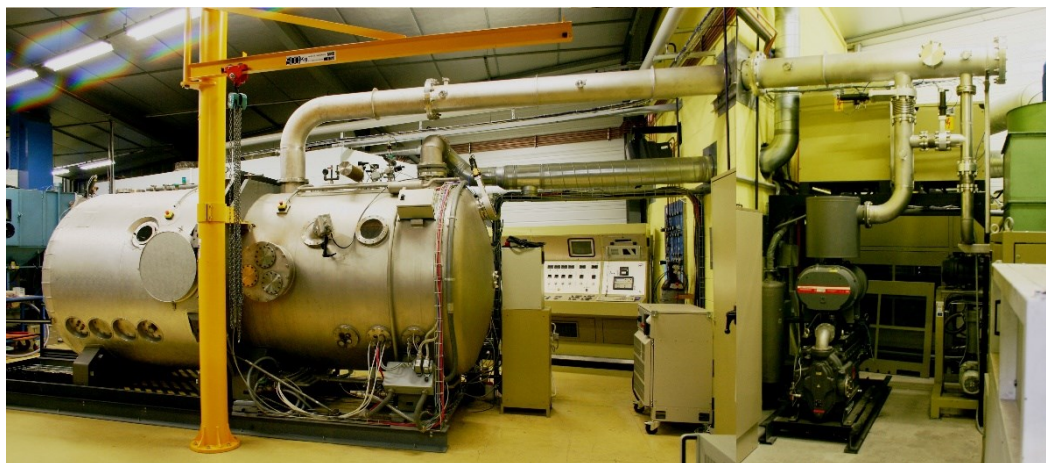
Contact : christophe.verdy@utbm.fr



16



# Quelques exemples de développements



17

Contacts : [christophe.verdy@utbm.fr](mailto:christophe.verdy@utbm.fr)

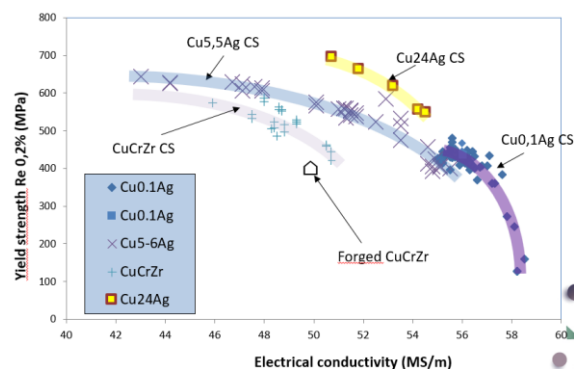
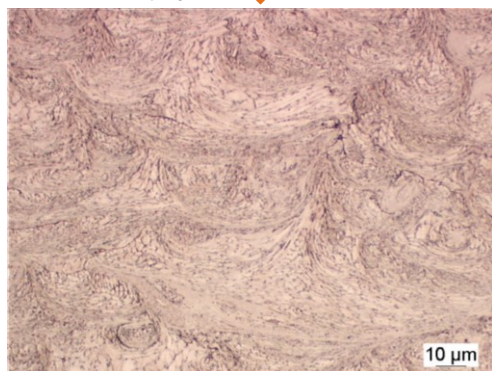


17

# Fabrication Additive des alliages de cuivre

- Cold spray sous Hélium recyclé
- Propriétés mécaniques supérieures au CuCrZr forgé

Direction de la projection ↓



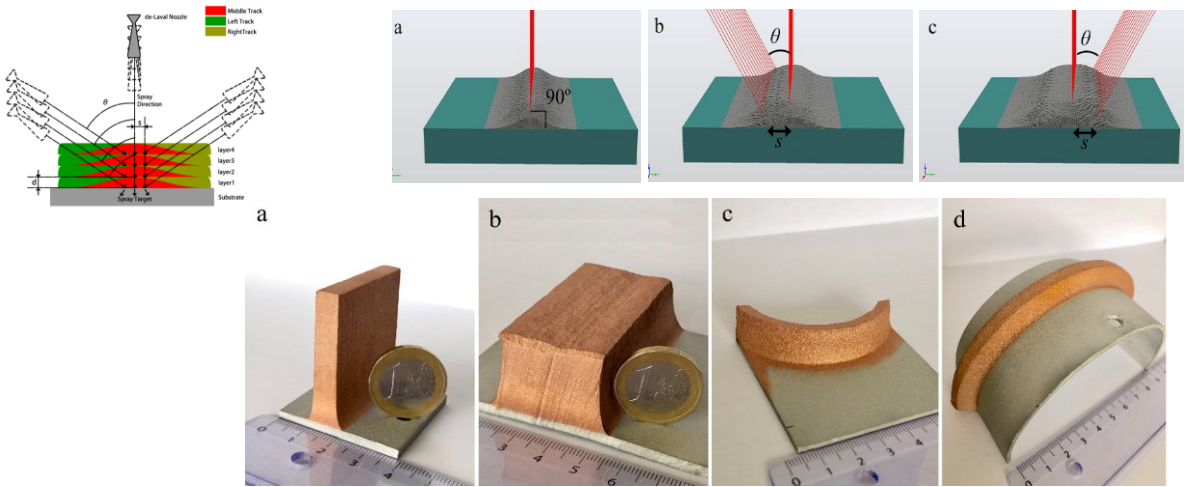
18

Contacts : [christophe.verdy@utbm.fr](mailto:christophe.verdy@utbm.fr) [ludovic.vitu@utbm.fr](mailto:ludovic.vitu@utbm.fr)



18

# Fabrication additive par cold spray



19

Contact : [sihao.deng@utbm.fr](mailto:sihao.deng@utbm.fr)



19

# Fabrication additive

## ➤ Fusion laser sur lit de poudre (Selective Laser Melting)

- Nouvelles compositions: AG3, Al6061, Cuivre, Acier H13, TiNb



**REALIZER SLM300-400W**  
300x300x300mm



**REALIZER SLM250-100W**  
Sous vide



**TRUMPF**  
TruPrint 1000 LASER Vert

20

Contacts : [christophe.verdy@utbm.fr](mailto:christophe.verdy@utbm.fr) [ludovic.vitu@utbm.fr](mailto:ludovic.vitu@utbm.fr)



20

# Nos machines SLM

**TRUMPF**



- $\lambda = 515 \text{ nm}$  laser à fibre CW
- $\varnothing$  Faisceau : 200  $\mu\text{m}$
- $P_{\text{max}} = 500 \text{ W}$
- $E_{\text{couche}} = 10 - 60 \mu\text{m}$
- Chauffage = -
- Sonde  $\text{O}_2 = < 100 \text{ ppm}$

**REALIZER** SLM  
Selective Laser Melting

- $\lambda = 1064 \text{ nm}$  laser à fibre CW
- $\varnothing$  Faisceau : 35  $\mu\text{m}$
- $P_{\text{max}} = 400 \text{ W}$
- $E_{\text{couche}} = 20 - 120 \mu\text{m}$
- Chauffage = 150  $^{\circ}\text{C}$
- Sonde  $\text{O}_2 = < 100 \text{ ppm}$

21

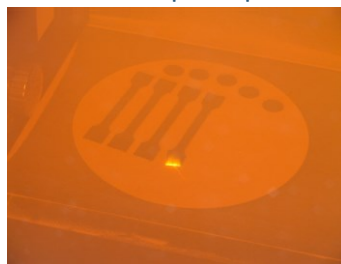
Contacts : [christophe.verdy@utbm.fr](mailto:christophe.verdy@utbm.fr) [ludovic.vitu@utbm.fr](mailto:ludovic.vitu@utbm.fr)



21

# SLM Triumph TruPrint 1000 laser vert

- Acquisition d'une machine SLM Trumpf TruPrint 1000 (janvier 2021)
- Intérêt industriel pour le Cu et ses alliages
- Poudre de Cu : 10% d'absorption pour un laser IR, 30 à 40% pour un laser vert



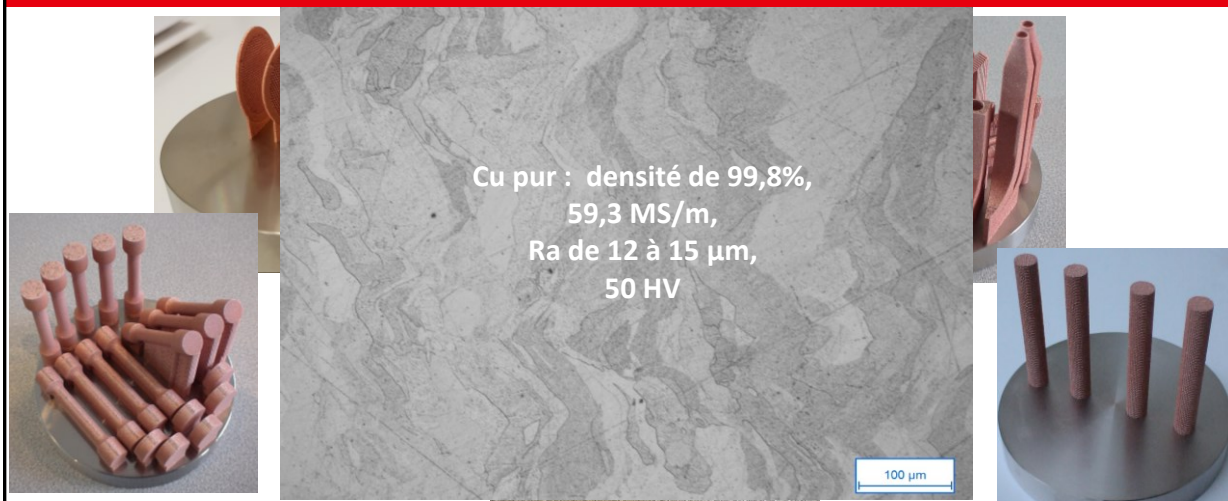
22

Contacts : [christophe.verdy@utbm.fr](mailto:christophe.verdy@utbm.fr) [ludovic.vitu@utbm.fr](mailto:ludovic.vitu@utbm.fr)



22

# Fabrication Additive des alliages de cuivre



23

Contacts : [christophe.verdy@utbm.fr](mailto:christophe.verdy@utbm.fr) [ludovic.vitu@utbm.fr](mailto:ludovic.vitu@utbm.fr)



23

Quelques exemples de développements

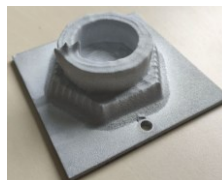
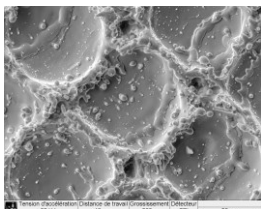
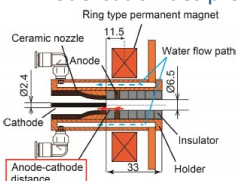
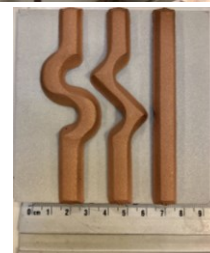
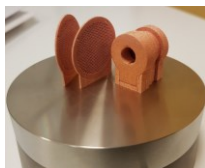
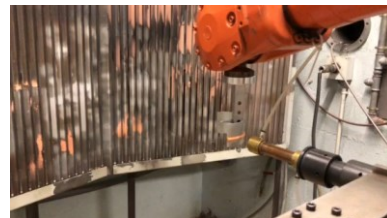
24



24

# Quelques exemples de développements

- préparation de surfaces avant projection par texturation laser
- développement de torche plasma à cascade
- SLM d'alliages de cuivre
- mise en forme par projection thermique : Cold Spray
- simulation et optimisation des trajectoires
- modélisation des procédés



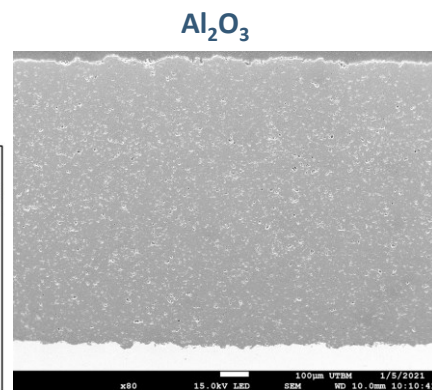
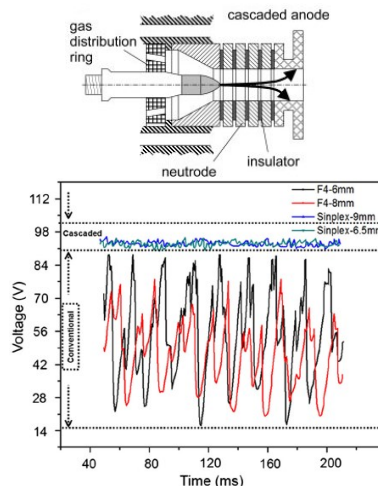
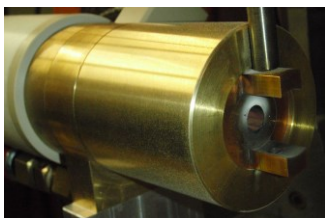
25

Contacts : [sihao.deng@utbm.fr](mailto:sihao.deng@utbm.fr)



25

# Torche plasma à cascade / matériaux céramiques



26

**Collaboration industrielle Gulhfi (Suisse)**

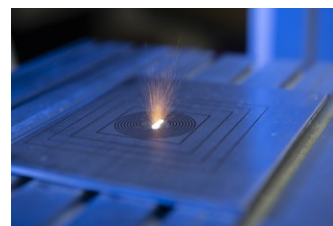
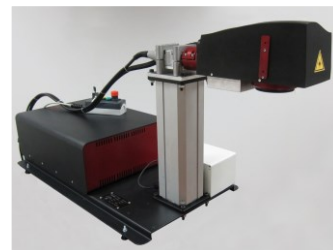
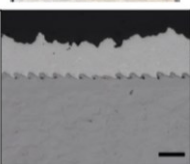
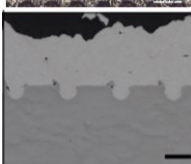
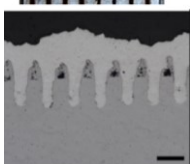
Contacts : [geoffrey.darut@utbm.fr](mailto:geoffrey.darut@utbm.fr)



26

## Ex. développements : Texturation surface

- préparation de surfaces avant projection par texturation laser
- générer une surface texturée : trous, rayures, cercles, etc.
- laser pulsé (Nd:YAG)
  - puissance moyenne  $\leq 20$  W
  - fréquence : 20-100 kHz
  - durée de pulse :  $\sim 100$  ns



27

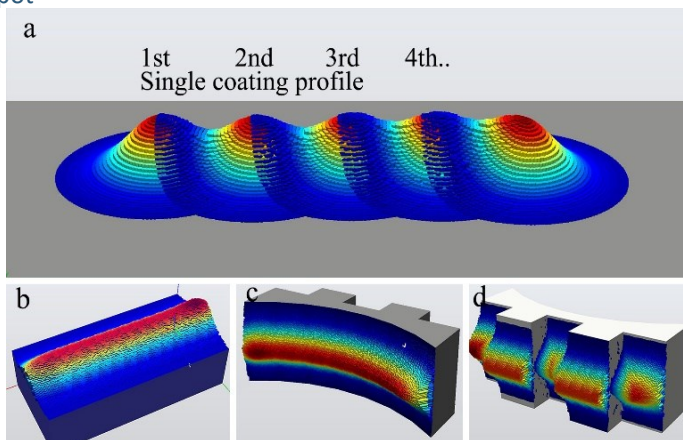
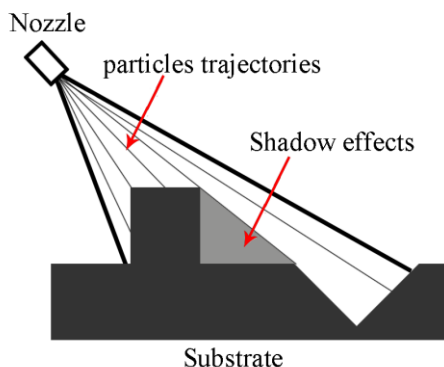
Contacts : [sophie.costil@utbm.fr](mailto:sophie.costil@utbm.fr) [ludovic.vitu@utbm.fr](mailto:ludovic.vitu@utbm.fr)



27

## Simulation du process de FA par CS

- Défi : l'effet d'ombre et formation du dépôt



28

Contacts : [sihao.deng@utbm.fr](mailto:sihao.deng@utbm.fr)

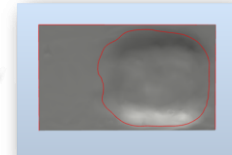
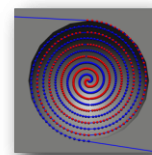
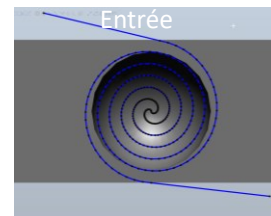
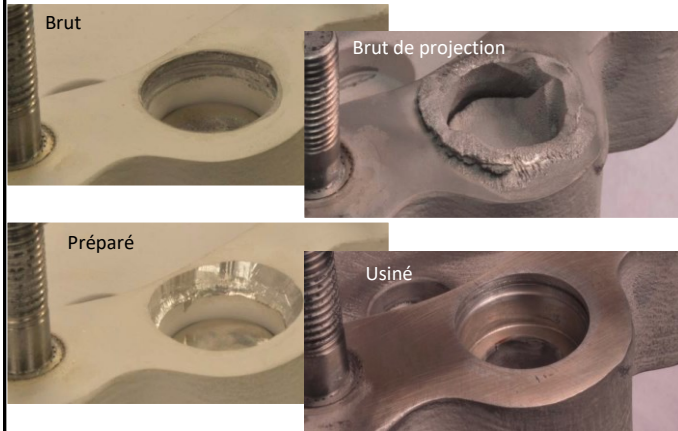


28

# Réparation par C.S.

► Exemple de réparation d'une pièce métallique

→ Défi : stratégie de la trajectoire robot



29

Contacts : [sihao.deng@utbm.fr](mailto:sihao.deng@utbm.fr)



29

# Réparation par C.S.

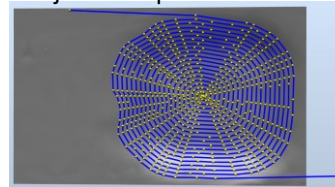
Pièce à revêtir



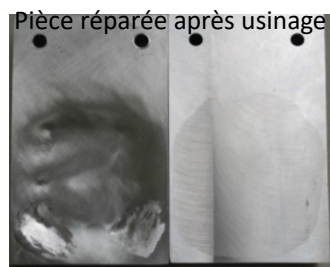
Pièce après projection



Trajectoire spirale du robot



Pièce réparée après usinage



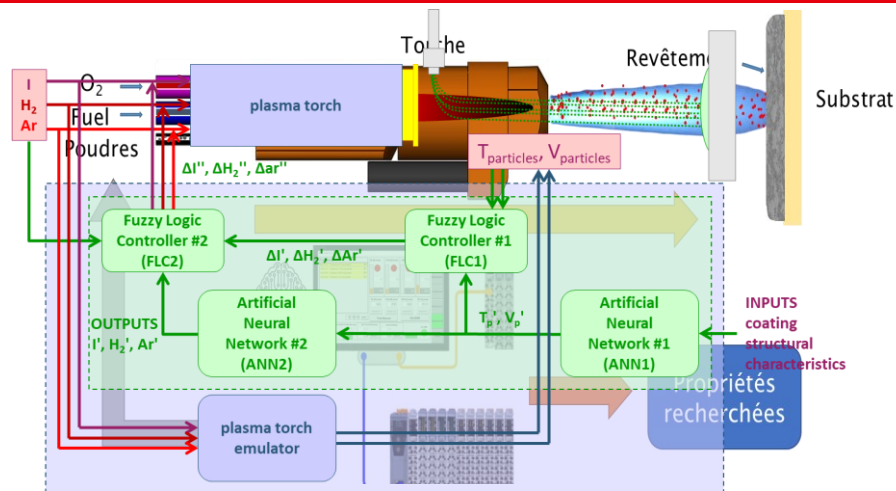
30

Contacts : [sihao.deng@utbm.fr](mailto:sihao.deng@utbm.fr)



30

# Intégration de l'I.A. dans nos procédés



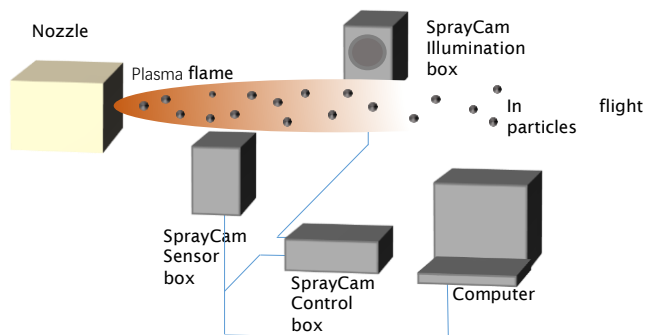
31

Contacts : sihao.deng@utbm.fr



31

# I.A. caractéristiques des poudres dans un jet



Système SprayCam  
Control vision

- Développement d'un algorithme pour la détection des particules de poudre à partir d'une visualisation du jet
- Suivi des particules
- Evaluation de la taille et de la vitesse des particules

32

Contacts : marie-pierre.planche@utbm.fr

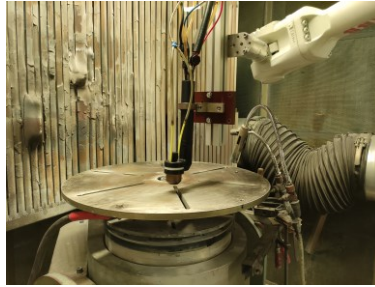
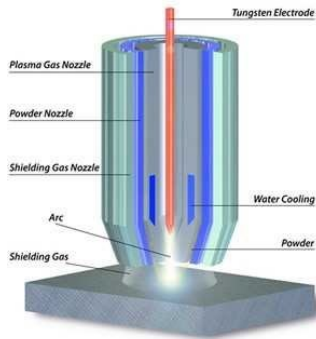


32



# Développement PTAAM

## ► Plasma Tranfert Arc Additive Manufacturing



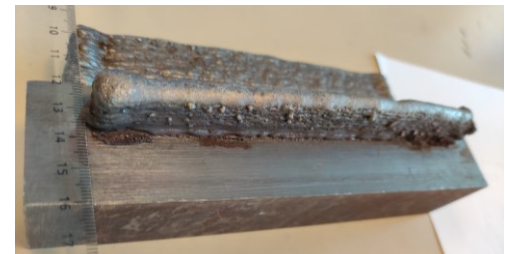
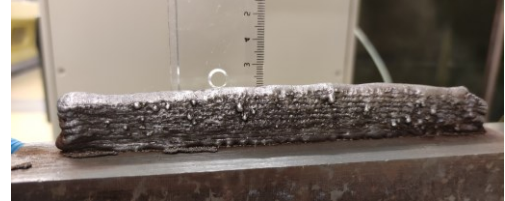
33

Contacts : [hanlin.liao@utbm.fr](mailto:hanlin.liao@utbm.fr) [sihao.deng@utbm.fr](mailto:sihao.deng@utbm.fr)



33

# Développement PTAAM



40 layers; thickness: ~ 8 mm ; High: ~ 43 mm

20 layers; thickness: ~ 8mm ; High: ~ 21 mm

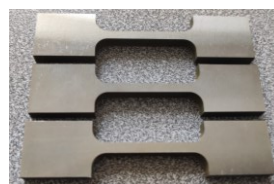
34

Contacts : [hanlin.liao@utbm.fr](mailto:hanlin.liao@utbm.fr) [sihao.deng@utbm.fr](mailto:sihao.deng@utbm.fr)



34

# Développement PTAAM



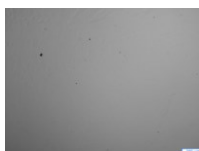
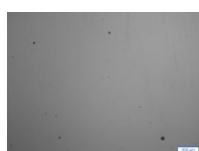
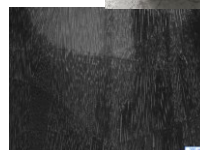
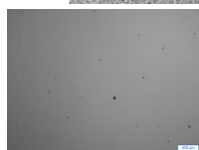
35

Contacts : [hanlin.liao@utbm.fr](mailto:hanlin.liao@utbm.fr) [sihao.deng@utbm.fr](mailto:sihao.deng@utbm.fr)



35

# Développement PTAAM



Avant attaque chimique, porosité 0,5%

Après attaque chimique

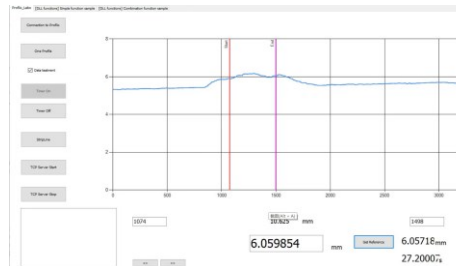
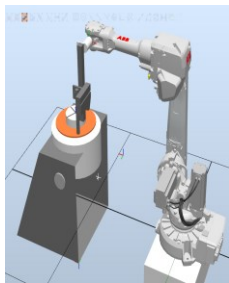
36

Contacts : [hanlin.liao@utbm.fr](mailto:hanlin.liao@utbm.fr) [sihao.deng@utbm.fr](mailto:sihao.deng@utbm.fr)



36

# Développement PTAAM



PTA  
316L



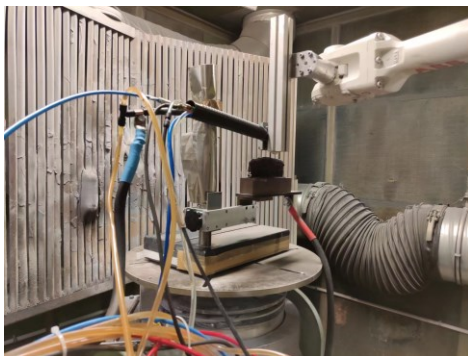
37

Contacts : [hanlin.liao@utbm.fr](mailto:hanlin.liao@utbm.fr) [sihao.deng@utbm.fr](mailto:sihao.deng@utbm.fr)



37

# Développement PTAAM



38

Contact : [hanlin.liao@utbm.fr](mailto:hanlin.liao@utbm.fr) [sihao.deng@utbm.fr](mailto:sihao.deng@utbm.fr)



38

## Fabrication additive au sein de l'ICB

- Projet CALYPSO en partenariat avec l'entreprise LISI Automotive
- Procédé hybride laser/projection à froid
- Assemblage-multi matériaux

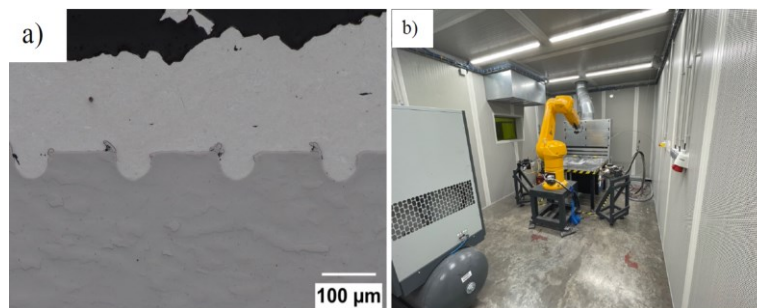


Figure 1 : a) Micrographies de cavités remplies par projection à froid de poudre, b) démonstrateur pour l'assemblage de pièces multi matériaux

39

Contact : [ludovic.vitu@utbm.fr](mailto:ludovic.vitu@utbm.fr)



39

## Assemblage par cold spray

Texturation laser

Cold Spray

Procédé innovant et breveté :  
**LISI μ-MACH AP®** (Delle (90), France)  
*(micro Mechanical Anchoring Cold Hybrid Assembly Process)*

→ **Assemblage multi-matériaux acier/aluminium**

40

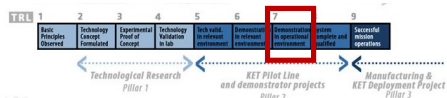
Contact : [ludovic.vitu@utbm.fr](mailto:ludovic.vitu@utbm.fr)

lisi  
AUTOMOTIVE



40

# Procédé Hybride



Démonstrateur en environnement industriel



41

Contact : [ludovic.vitu@utbm.fr](mailto:ludovic.vitu@utbm.fr)



41

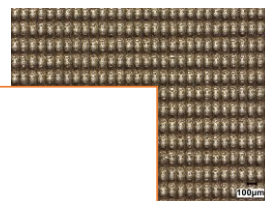
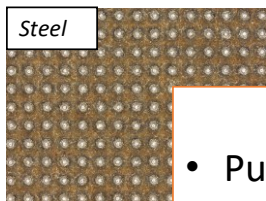
# Procédé Hybride

Hole matrix

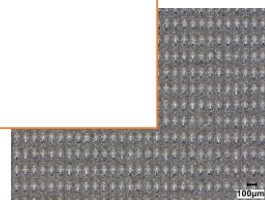
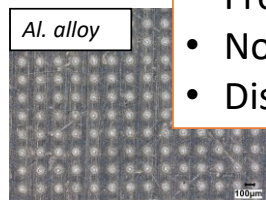
Concentric circles

Lines

Steel



Al. alloy



Paramètres étudiés :

- Puissance (W) de 1 à 20 W
- Fréquence (kHz) de 20 à 100 kHz
- Nombre de pulses de 1 à 120
- Distance focale : 160 mm

42

Contact : [ludovic.vitu@utbm.fr](mailto:ludovic.vitu@utbm.fr)

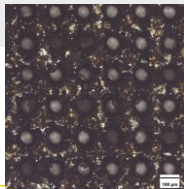
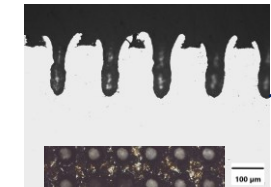
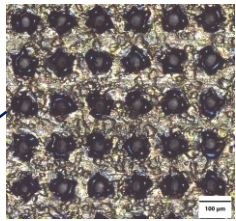
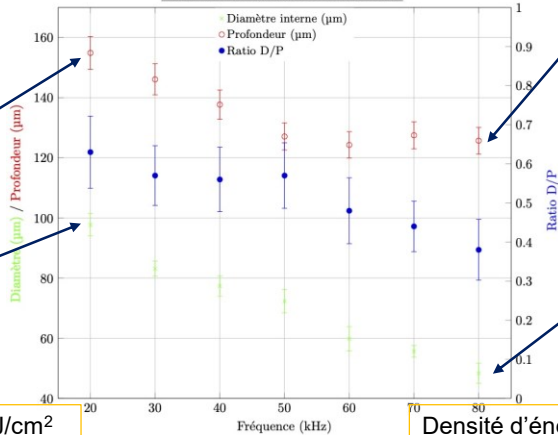


42

# Procédé Hybride

P mesurée (W)	17
N	100
Df (mm)	160

Influence de la fréquence sur le diamètre interne et la profondeur (µm) de l'acier DP600



Densité d'énergie à 20 kHz : 30.1 J/cm<sup>2</sup>

Densité d'énergie à 80 kHz : 7.5 J/cm<sup>2</sup>

43

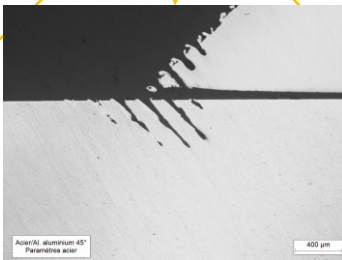
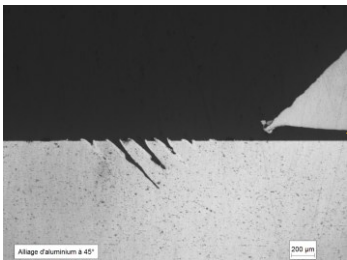
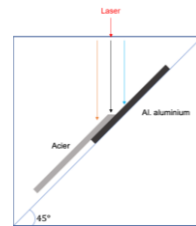
Contact : [ludovic.vitu@utbm.fr](mailto:ludovic.vitu@utbm.fr)



43

# Procédé Hybride

P (W)	17
N	100
F (kHz)	20
Df (mm)	160



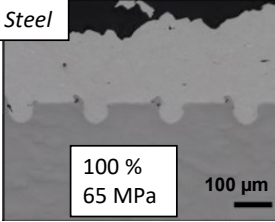
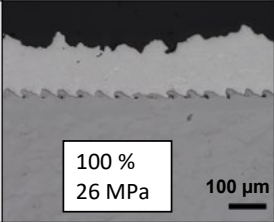
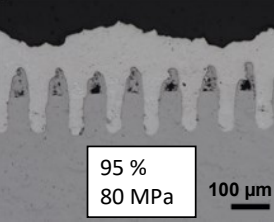
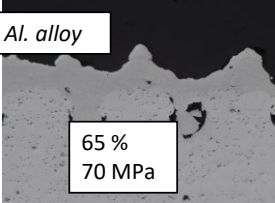
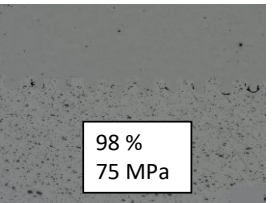
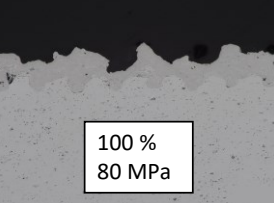
44

Contact : [ludovic.vitu@utbm.fr](mailto:ludovic.vitu@utbm.fr)










44

# Procédé Hybride

Hole matrix	Concentric circles	Lines
<p><b>Steel</b></p>  <p style="text-align: center;">100 % 65 MPa</p> <p style="text-align: right;">100 μm</p>	<p><b>Concentric circles</b></p>  <p style="text-align: center;">100 % 26 MPa</p> <p style="text-align: right;">100 μm</p>	<p><b>Lines</b></p>  <p style="text-align: center;">95 % 80 MPa</p> <p style="text-align: right;">100 μm</p>
<p><b>Al. alloy</b></p>  <p style="text-align: center;">65 % 70 MPa</p>	<p><b>Concentric circles</b></p>  <p style="text-align: center;">98 % 75 MPa</p>	<p><b>Lines</b></p>  <p style="text-align: center;">100 % 80 MPa</p>

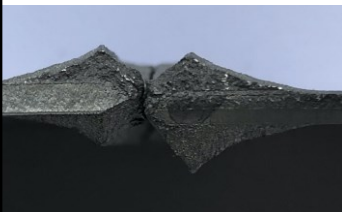
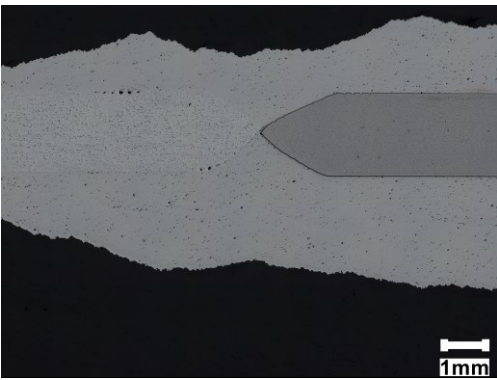
45      Contacts : [ludovic.vitu@utbm.fr](mailto:ludovic.vitu@utbm.fr)

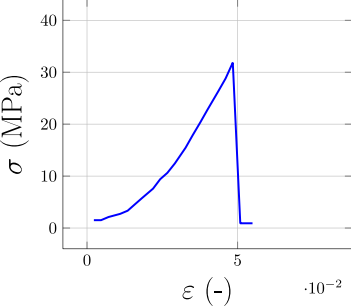








45








# Procédé Hybride

Steel
Aluminum alloy

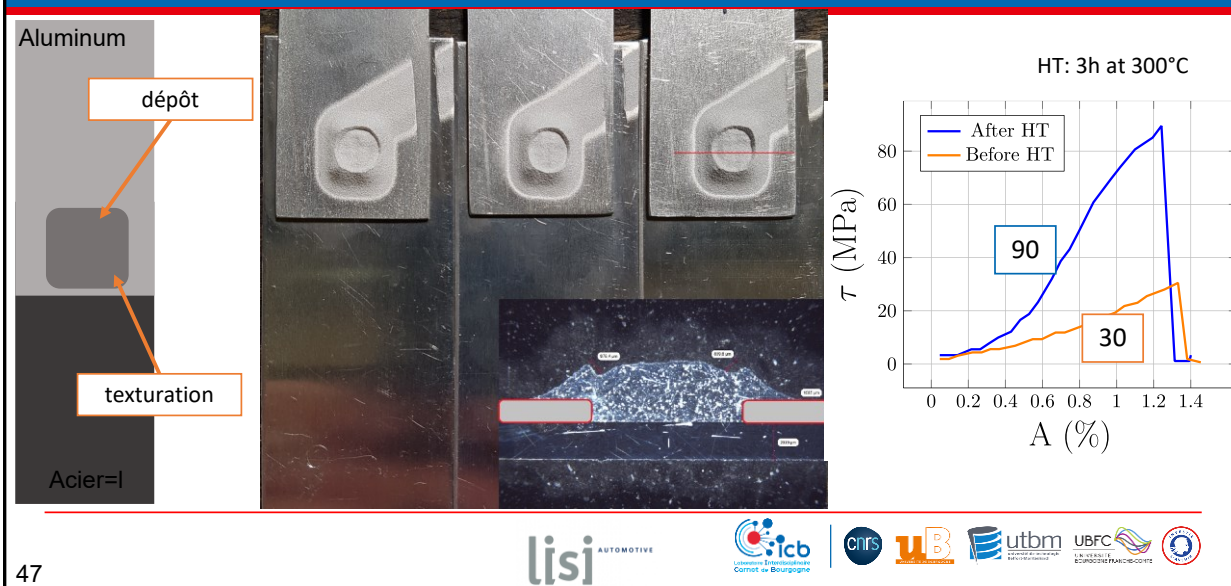


46      Contact : [ludovic.vitu@utbm.fr](mailto:ludovic.vitu@utbm.fr)

46

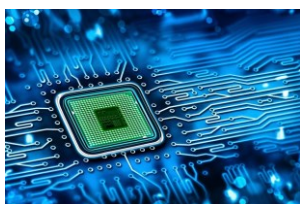
# Procédé Hybride



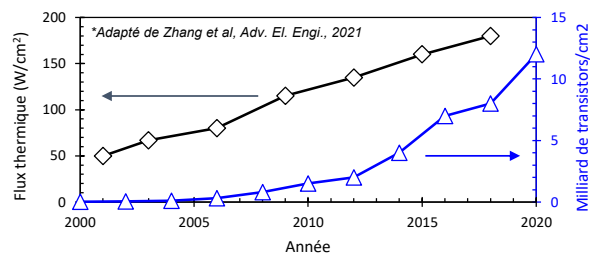
47

# Les dissipateurs de chaleur

- Le gestion de chaleur == un enjeu majeur pour la microélectronique



Miniaturisation



→ 55% des défaillances sont dues à un échauffement excessif

→ Problématique commune au photovoltaïque, batteries, pile à combustible

48

Contact : [olivier.marconot@utbm.fr](mailto:olivier.marconot@utbm.fr)



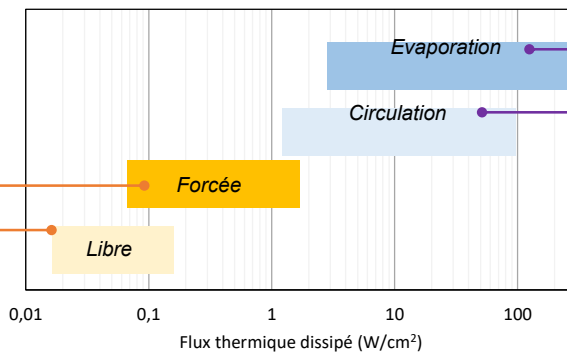
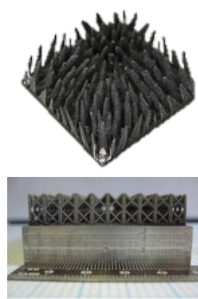
48



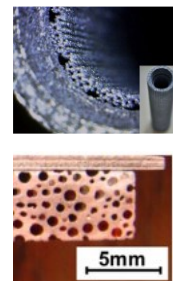
# Les dissipateurs de chaleur

- Les différents systèmes réalisés en fabrication additive métallique:

Refroidissement air/  
radiation



Refroidissement eau



\*Ameli et al, Appl. Therm. Eng., 2013  
\*Zhang et al, J. Heat. Mass Transf. 2013

\*Dede et al, J. Mech. Design, 2015  
\*Wong et al, J. Heat. Mass Transf. 2009

49

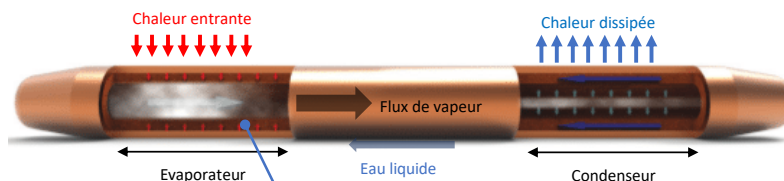
Contact : [olivier.marconot@utbm.fr](mailto:olivier.marconot@utbm.fr)



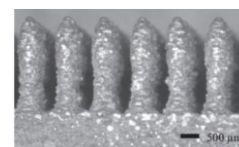
49

# Les dissipateurs de chaleur

- Zoom sur les systèmes à changement de phase:



Structure dite de mèche :  
capillarité + évaporation



\*Whang et al, J. Heat. Mass Transf. 2018

- Peu de travaux en fabrication additive sur du cuivre (haute conductivité thermique)

50

Contact : [olivier.marconot@utbm.fr](mailto:olivier.marconot@utbm.fr)

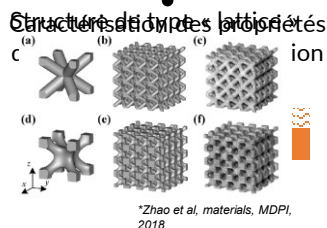


50

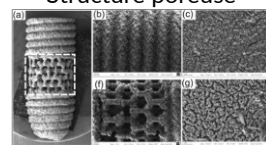
# Les dissipateurs de chaleur

Réalisation de structures poreuses de cuivre par fabrication additive pour la dissipation de chaleur

Paramétrie de LPBF avec la TruePrint 1000



Structure poreuse



\*Yang et al. Sci. Rep., 2017

51

Contact : [olivier.marconot@utbm.fr](mailto:olivier.marconot@utbm.fr)



51

## Un petit mot pour nos collègues : BV Proto

- *Activité principale*
  - Fabrication rapide de pièces métalliques
  - Pièces unitaires ou petites série
- *Début d'activité*
  - 03 Septembre 2007
- *Coordonnées*
  - Jean-Jacques BERTRAND :
    - 06.77.39.86.21
    - [jean-jacques.bertrand@bvproto.eu](mailto:jean-jacques.bertrand@bvproto.eu)
  - Alexis VION :
    - 06.83.46.27.75
    - [alexis.vion@bvproto.eu](mailto:alexis.vion@bvproto.eu)
  - [www.bvproto.eu](http://www.bvproto.eu)



52



52

# Les moyens de BV Proto

- **Moyens de production**
  - Machine EOS M270
  - Machine EOS M280
- **Matières disponibles en interne**
  - Aciers Inox 316L (1.4404)
  - Acier Inox Haute Température (1.4828)
- **Autres matières en sous-traitance**
- **Principaux secteurs d'activité**
  - Automobile
  - Bureaux d'études
  - Médical
  - Outillage
  - Centres de recherches



- **Délai de livraison moyen**
  - 5 à 10 jours ouvrés

53

Contact : [alexis.vion@bvproto.eu](mailto:alexis.vion@bvproto.eu)

53

# Quelques réalisations de BV Proto



54

Contact : [alexis.vion@bvproto.eu](mailto:alexis.vion@bvproto.eu)

54

# Conclusion

## Nos forces

- Maîtrise de la fabrication de la poudre jusqu'à la pièce en passant par le procédé
- FA par SLM depuis 2009
- 1ère machine TruPrint 1000 en France (7ème en Europe)
- Tour d'atomisation (composition, taille, morphologie)

## Développements

- Alliages de Cu hautes performances, laiton, CuBe, Cu pur ...
- HEA, ferromagnétiques
- De nouveaux procédés (de projections, d'atomisation, de torche)
- Contrôle in-situ
- Intelligence Artificiel

55



55



**Merci pour votre attention.**

**Avez-vous des questions ?**

[ludovic.vitu@utbm.fr](mailto:ludovic.vitu@utbm.fr)

pour l'équipe du laboratoire ICB-Lermps

(Sophie COSTIL, Geoffrey DARUT, Sihao DENG, Cécile LANGLADE, Hanlin LIAO, Olivier MARCONOT, Sabeur MSOLLI, Marie-Pierre PLANCHE, Rija-Nirina RAOELISON, Christophe VERDY)

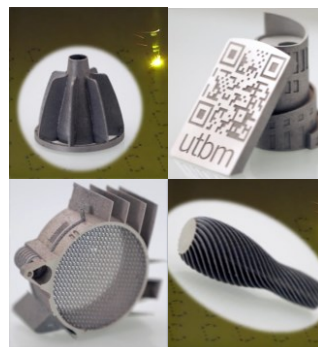
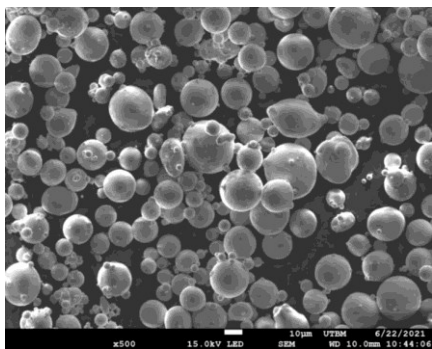
Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne  
ICB UMR CNRS 6303  
[icb.u-bourgogne.fr](http://icb.u-bourgogne.fr)



56

# Fabrication additive au sein de l'ICB

De la poudre à la pièce ...



<http://lermps.utbm.fr/>

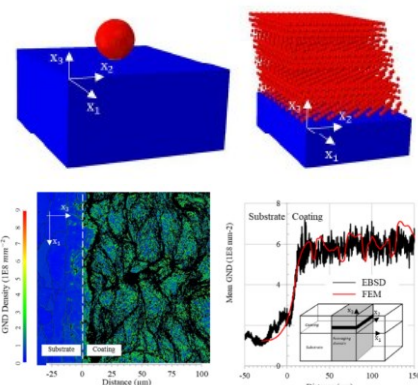
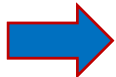
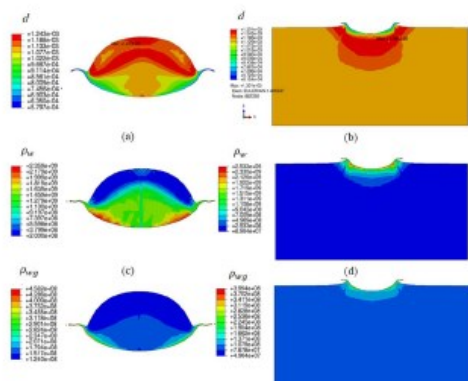


57

# Fabrication additive au sein de l'ICB

Prédiction de l'évolution de la microstructure des revêtements obtenus par projection à froid (Cold Spray)

- Taille des grains
- Densité des dislocations dans les murs
- Densité des dislocations GND



Msolli et al., 2021. An experimentally validated dislocation density based computational framework for predicting microstructural evolution in cold spray process, International Journal of Solids and Structures. Volume 225, 111065.

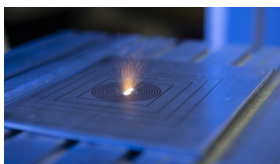
<http://lermps.utbm.fr/>



58

# Equipements disponibles

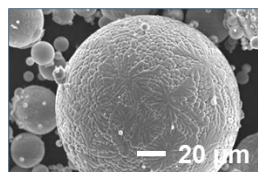
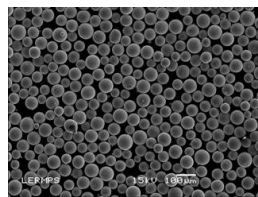
- Caractérisation
  - Métallographie et analyse d'images (optique et numérique)
  - Spectroscopie Raman
  - Granulométrie de poudres
  - essais mécaniques (traction, micro/macro dureté, IET)
  - Essais dynamiques (micro/macro impacts)
  - Analyses thermiques (DSC, ATG, ATD)
  - Profilométrie 3D (contact et optique)
- (Pre)/Post traitements
  - Laser de texturation
  - Glace carbonique
  - Malaxage
  - Jet d'eau
  - Sablage
  - Fours de traitement thermique (étuves, four en atmosphère neutre...)



59

# Equipements disponibles

- Matériaux précurseurs (poudres)
  - conception
  - élaboration
  - par broyage
  - par agglomération-séchage
  - par atomisation sous gaz
  - tamisage et élutriation

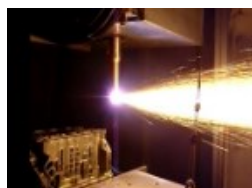


60

# Equipements disponibles

## ► Procédés de projection thermiques

- Flamme, flamme supersonique (HVOF)
- Arc électrique
- plasma atmosphérique (APS), atmosphère inerte (IPS), basse pression (LPPS)
- Projection en phase liquide
- Projection à froid (Haute et basse pression)
- Projection hybride Laser



61



61