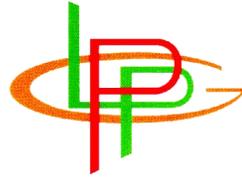




**RDM**  
RÉSEAU DES MÉCANICIENS



université  
PARIS-SACLAY



# Défis et quelques solutions pour la fabrication additive du cuivre.

Â. E. Crespi<sup>♦♦,\*</sup>, C. Ballage<sup>♦</sup>, T. Minea<sup>♦</sup>, J. Robert<sup>♦</sup>, D. Lundin<sup>♦</sup>, M. C. Hugon<sup>♦</sup>

<sup>♦</sup> GREMI Laboratory, CNRS, UMR 6606, 14 rue d'Issoudun, BP 6744, Orleans Cedex 2 45067, France

<sup>♦</sup> LPGP, Université Paris-Saclay, CNRS, F-91405 Orsay Cedex, France

<sup>♦</sup> Plasma & Coatings Physics Division, IFM, Linköping University, SE-581 83 Linköping, Sweden

Limoges – France 15 Juin 2023

université  
PARIS-SACLAY

# Sommaire

Contexte

Objectifs

Résultats

Réflectance

Fusion Laser

Propriétés électriques poudre

Conclusions

# Convention Industrielle de Formation par la Recherche



LPGP- Laboratoire de physique des gaz et des plasmas

Add Up Global solutions

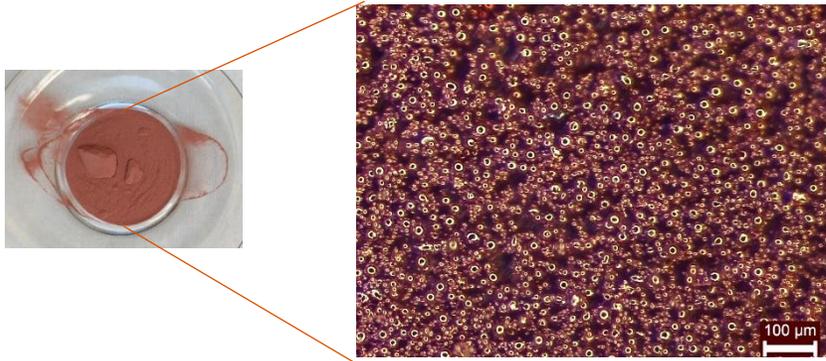


## Project AM-bition

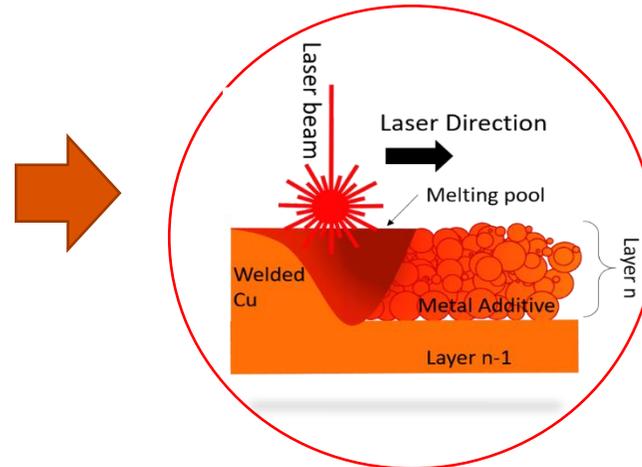


# Fusion de lits de poudre

Étalement de la couche de poudre

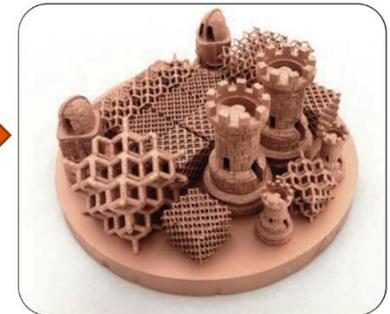
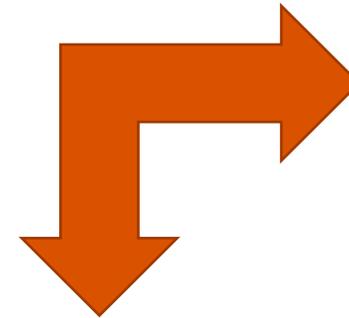


Fusion Sélective



Conduction thermique  
 $\sigma_{Cu} \sim 398 \text{ W/m K}$

Objet construit en couches

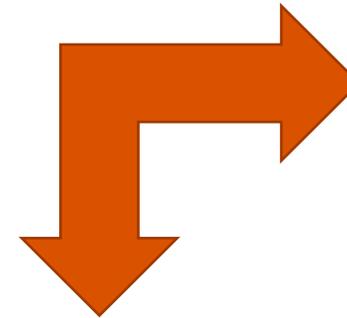
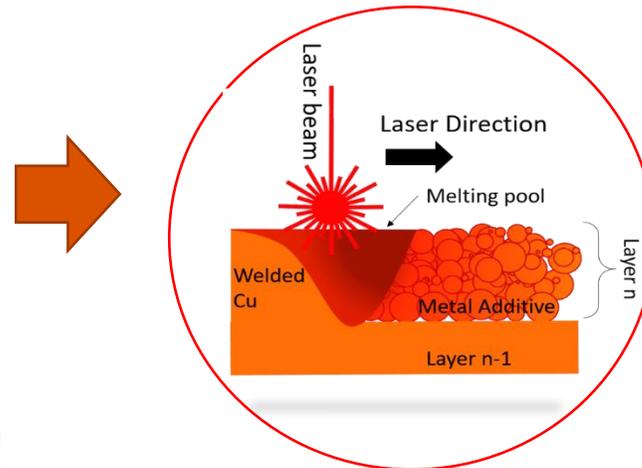
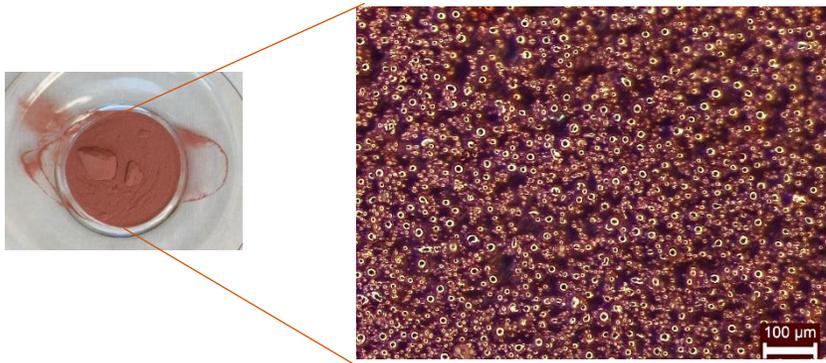


# Fusion de lits de poudre

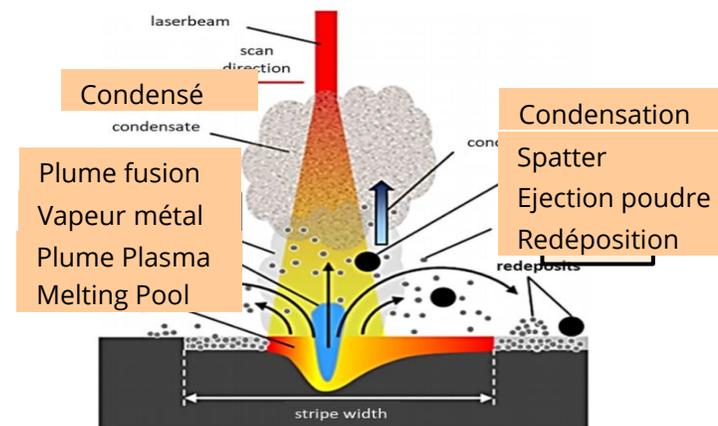
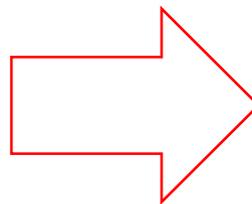
Étalement de la couche de poudre

Fusion Sélective

Objet construit en couches



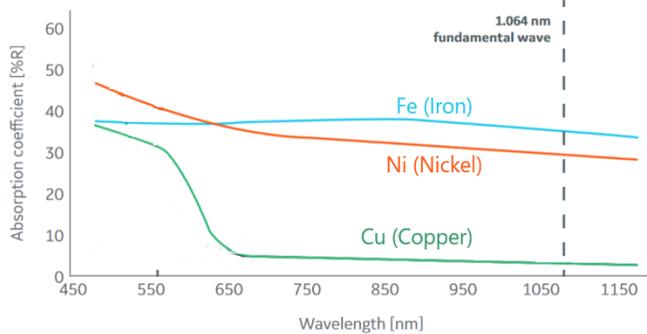
Problèmes!



# Carbone Amorphe

## Réflectance

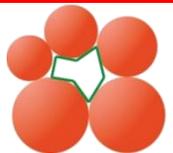
100 % réfléchissante à 1.05µm



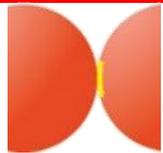
## Conduction

Bulk: 1.6723 µΩ cm

Résistivité Cu Poudre : ?



Les Interstices



Des Oxides

COÛTEUX



CARBONE

nature communications



Article

<https://doi.org/10.1038/s41467-023-38082-8>

## 3D printing of unsupported multi-scale and large-span ceramic via near-infrared assisted direct ink writing

Received: 20 August 2022

Accepted: 13 April 2023

Published online: 25 April 2023

Check for updates

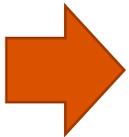
- Graphene - Nanoparticules
- Absorbants Amorphe

➤ Absorption de la réflectance  
➤ Réduction de l'oxygène dans le Cu  
➤ Meilleures propriétés mécaniques

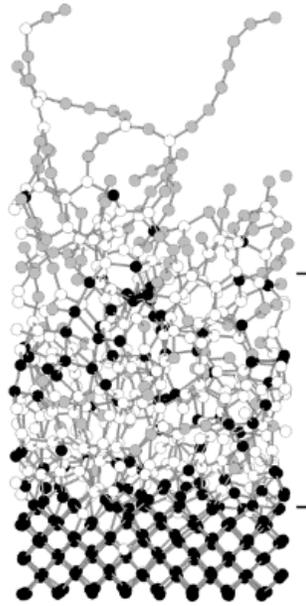
➤ Défauts  
➤ Séparation d'une phase carboné

# Carbone Amorphe

COÛTEUX

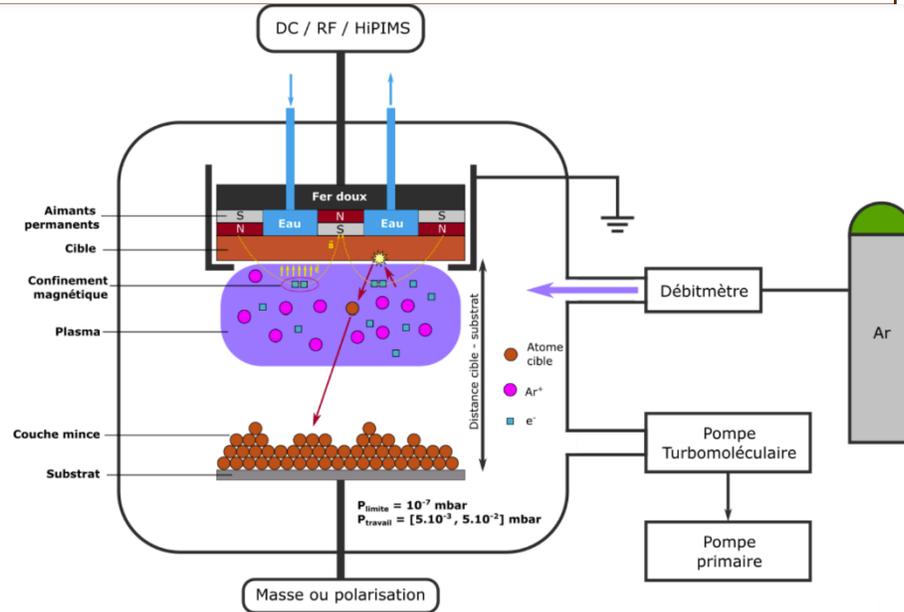


CARBONE



Carbone amorphe  
Hybridation  $Sp^2$   
Graphite -Noire

Pulverisation cathodique par magnétron  
Cible de carbone -plasma



Optimisation des propriétés du fil de carbone = noir et aussi conducteur que possible

# Objectifs

Créer un film mince sombre efficace en utilisant du carbone pour améliorer l'absorption sur des substrats de Cu sans endommager la conduction

Objectifs spécifiques:

1. Déposer et caractériser des films de carbone amorphe
2. Optimiser l'ajout de film pour préserver les propriétés électriques du Cu
- 3. Réduire l'énergie utilisée dans le processus d'impression 3D par fusion laser sur lit de poudre**
- 4. Comprendre les propriétés électriques des poudres utilisées comme matière première.**

# Sommaire

Contexte

Objectifs

Résultats

Réflectance

Fusion Laser

Propriétés électriques poudre

Conclusions

# Sommaire

Contexte

Objectifs

Résultats

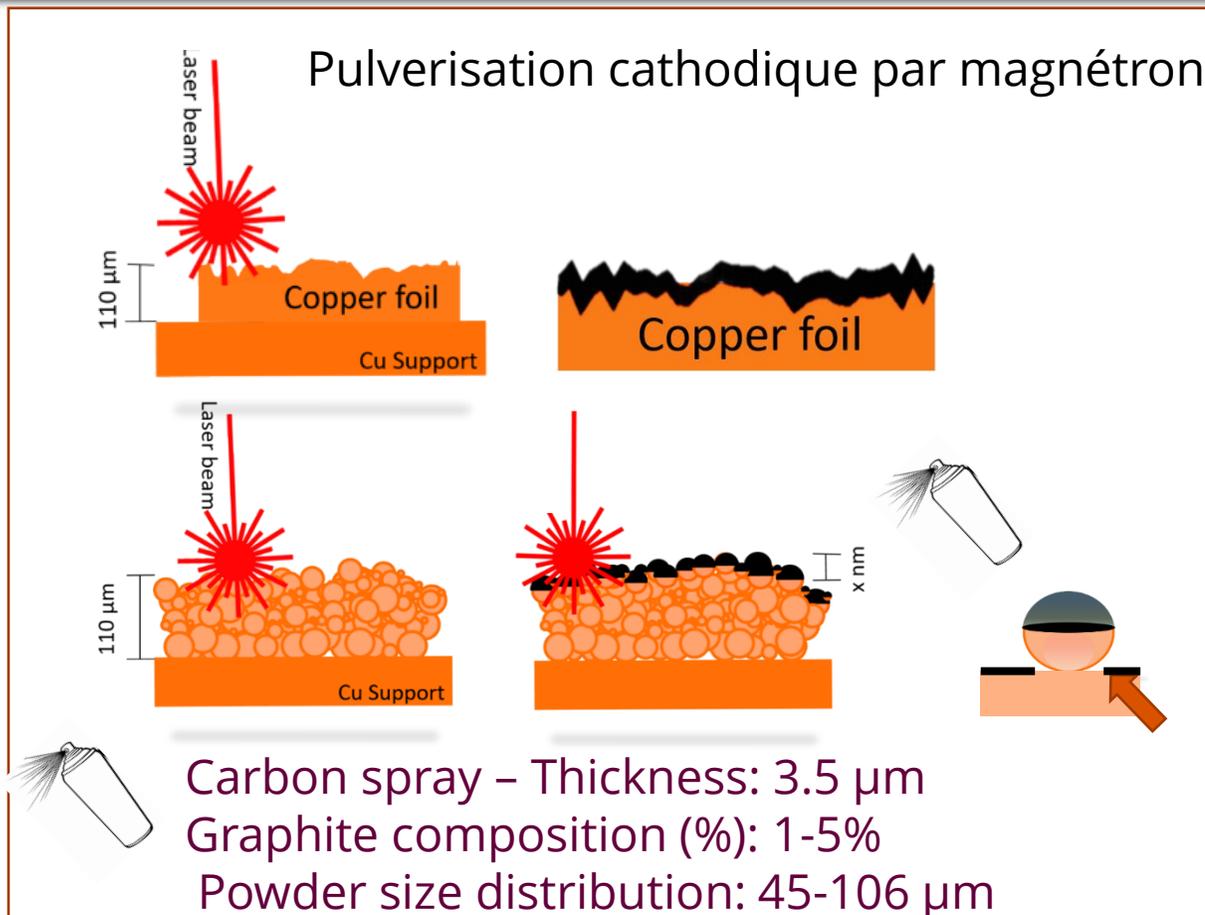
Réflectance

Fusion Laser

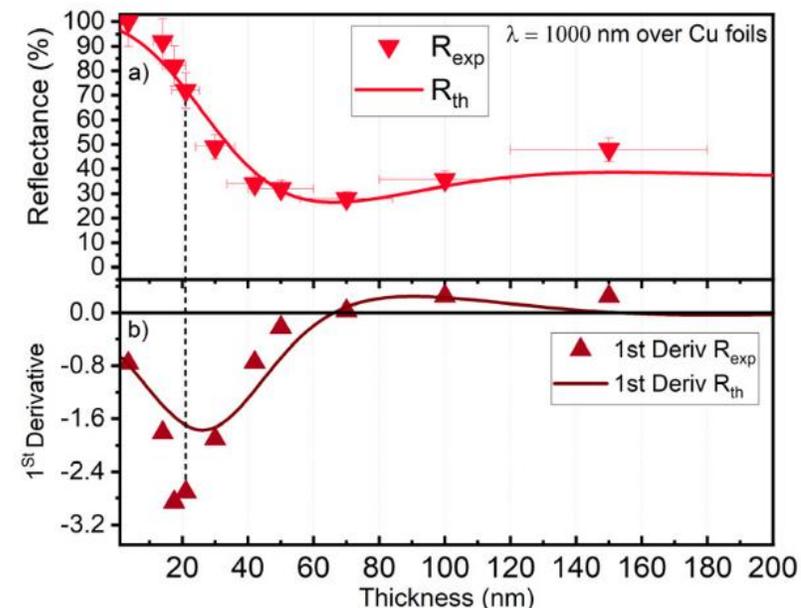
Propriétés électriques poudre

Conclusions

# Réflectance Cuivre-Carbone



Réflectance  
X  
Epaisseur de Carbone



Laser: Nd-YAG Triumph Laser top-hat TruDisk 10002.  $\phi$  = Densité de puissance  
Camera-8-10 k images par secondes  
 $\lambda = 1.05 \mu\text{m}$  - vitesse = 0.5 m/s - Spot  $\varnothing = 200 \mu\text{m}$

$$\phi = \frac{4 \text{ Puissance}}{\pi(\text{Spot } \varnothing)^2}$$

Energie de  
référence:  
2000 W



# Sommaire

Contexte

Objectifs

Résultats

Réflectance

Fusion Laser

Propriétés électriques poudre

Conclusions

# Sommaire

Contexte

Objectifs

Résultats

Réflectance

Fusion Laser

Propriétés électriques poudre

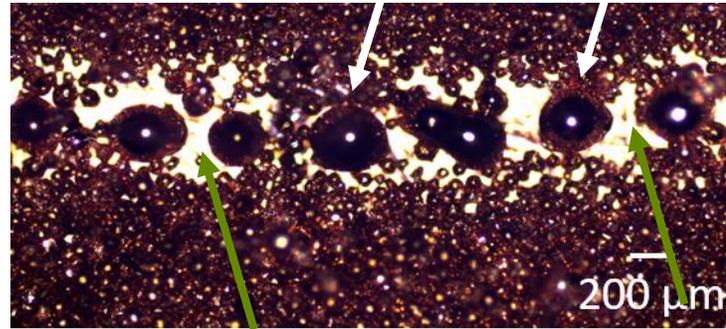
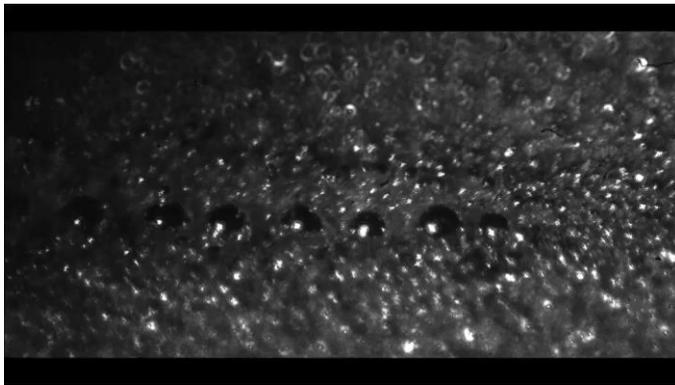
Conclusions

# Welding at 20 kW/ mm<sup>2</sup> – Comparison powder-

600 W

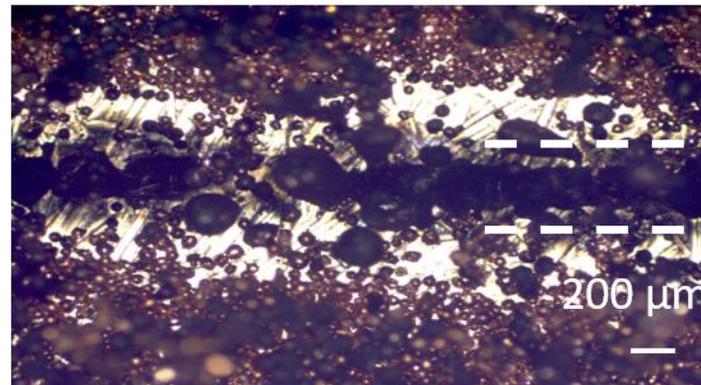
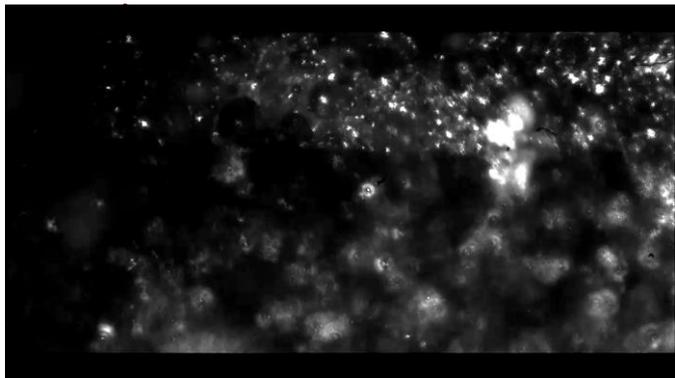


Poudre de Cu



- Effet Balling
- Denudation

Poudre de Cu + Spray carbone



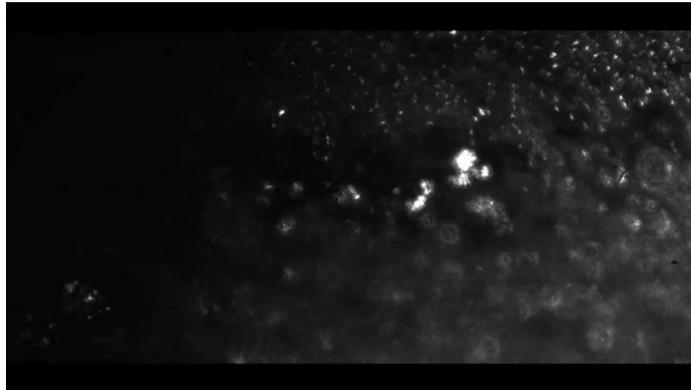
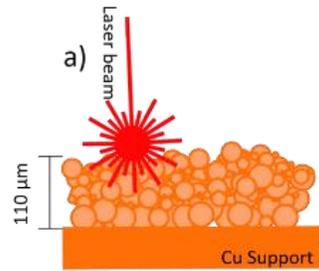
✓ Des points reliés

- Denudation

# Fusion à 64 kW/ mm<sup>2</sup> – Comparaison -

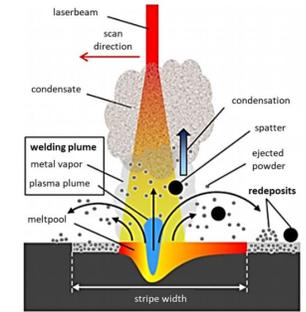
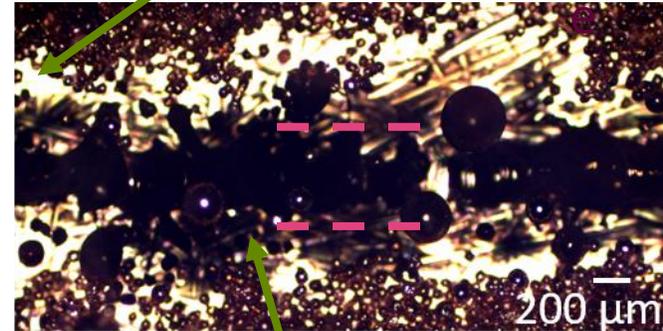


Poudre de Cu



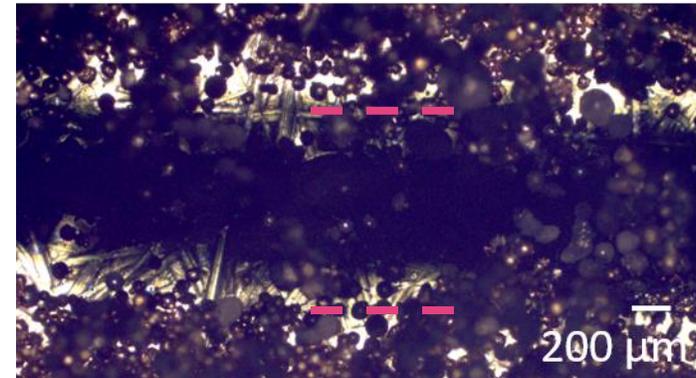
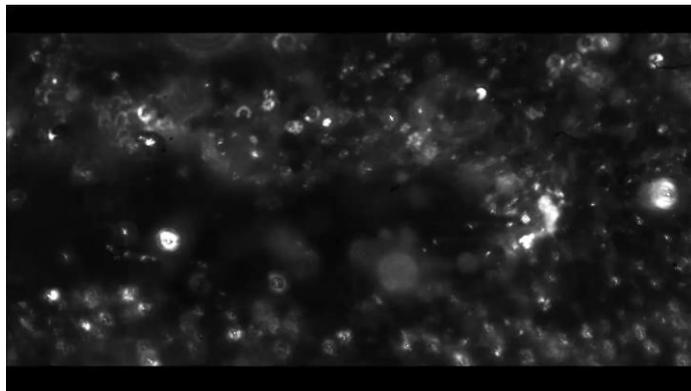
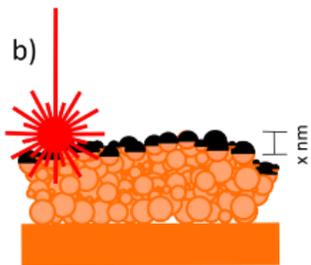
2000 W

Referenc



• Dénudation

Poudre de Cu + Spray carbone

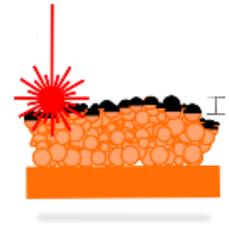
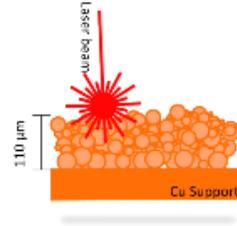


✓ Cordon  
continu  
✓ Dénudation

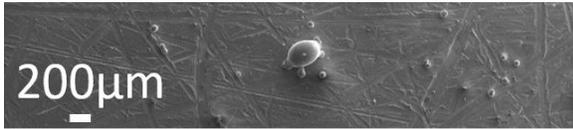
✓ Réduction des problèmes grâce au film de graphite

# Topographie de la fusion

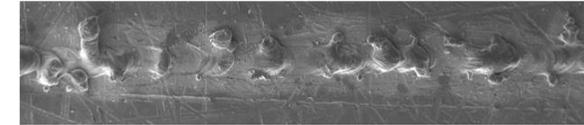
Topographie



600 W 20 kW/ mm<sup>2</sup>



1200 W 38 kW/ mm<sup>2</sup>

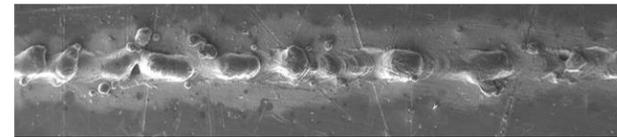
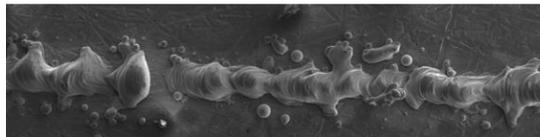


Effet balling

Cordon continue

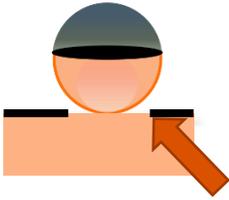
Reference

2000 W 64 kW/ mm<sup>2</sup>

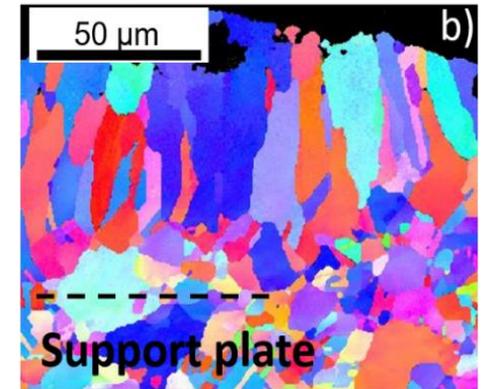


↑ Énergie : Cordon continue

Cross section

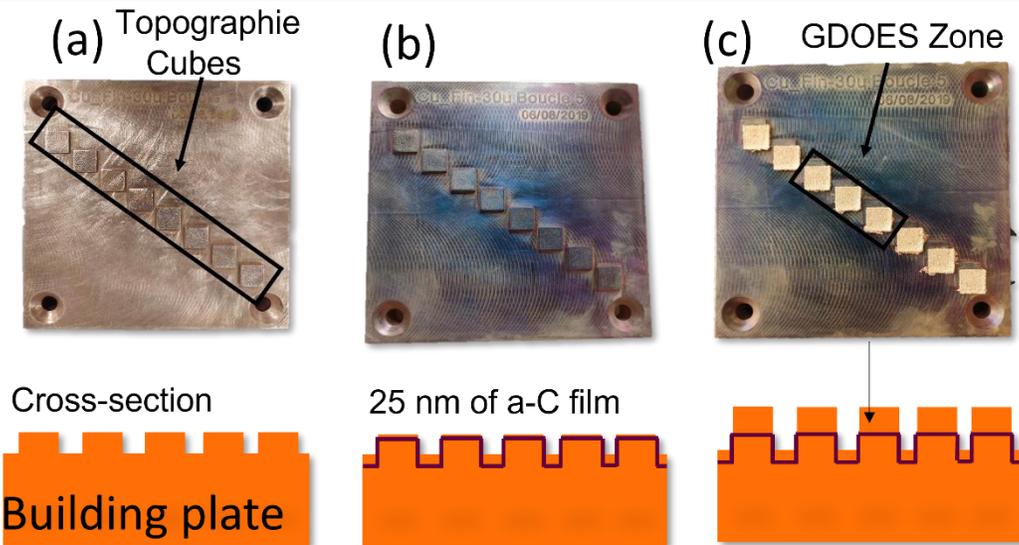


1200 W

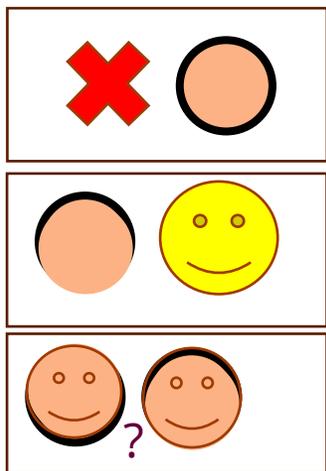


Reduction 40 %  
dans l'énergie  
de fusion

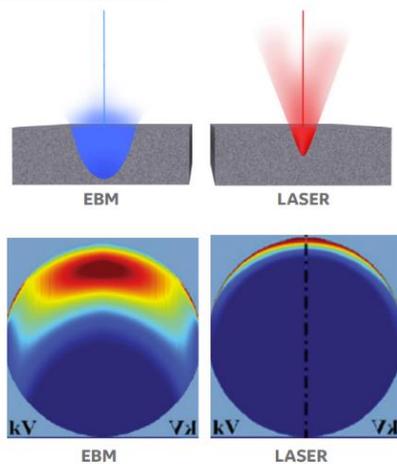
# Pièce imprimée en 3D -SLM



Orientation carbone sur cuivre

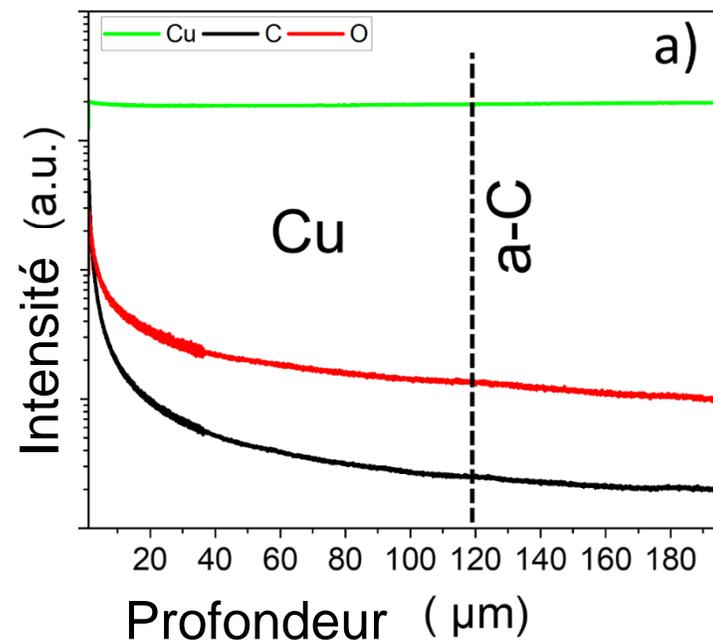


À vérifier



Energy transfer in Ti64 powder using EBM (left) and laser (right) technology.

Analyse Chimique en profondeur – glow discharge optical emission spectroscopy ( GDOES)



Pas de carbone trouvé en profondeur

# Sommaire

Contexte

Objectifs

Résultats

Réflectance

Fusion Laser

Propriétés électriques poudre

Conclusions

# Sommaire

Contexte

Objectifs

Résultats

Réflectance

Fusion Laser

Propriétés électriques poudre

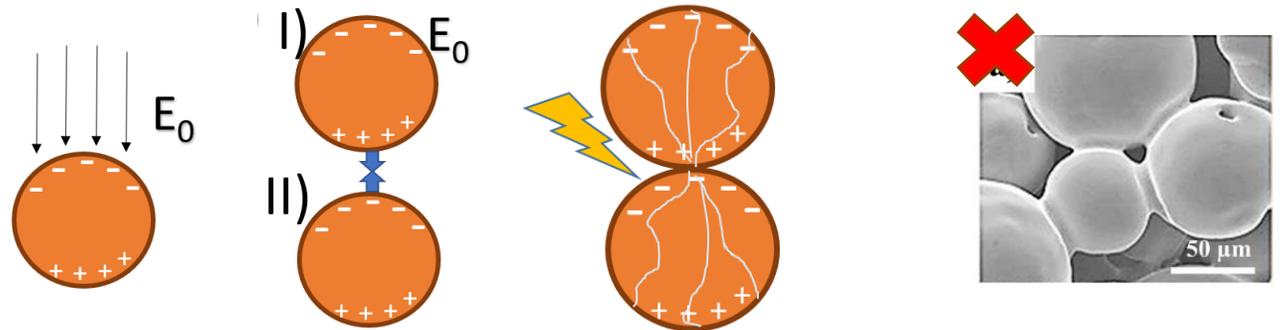
Conclusions

# Mécanismes d'agglomération des poudres



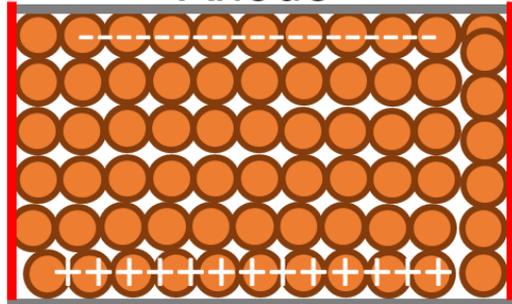
## Forces inter-particulaires

- ✓ Contribution Thermique
- ✓ Microcontacts
- ✓ Des forces de cohésion
- ✓ Dipôles



## Régime Isolant

Anode +



Cathode -

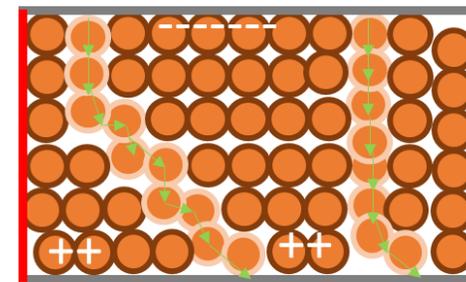
- ✓ Oxides
- ✓ Interstice



Transformation  
**Réversible**

## Régime conducteur

Anode +



Cathode -

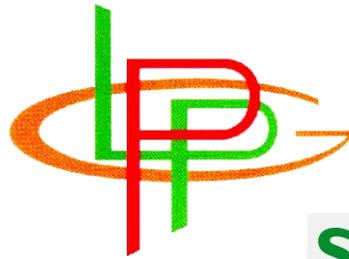
- ✓ Agglomeration

T.Q. Tran, A. Et al., Metals (Basel). 9 (2019) 756. <https://doi.org/10.3390/met9070756>.

Kurata, H. In *Jeol News*; Gennady Logvenov, Joachim Maier, P.A. van A., Ed.; Jeol, 2018; p. 25.

## Conclusion

- La réflectance du cuivre est réduite jusqu'à 80 % par les interférences.
- Les films ultraminces sont efficaces pour réduire la réflectance du cuivre. Une fusion satisfaisante est observée à 1200 W -38kW/mm<sup>2</sup>.
- Le carbone a tendance à quitter la piste de fusion.
- Le système de poudre de cuivre présente une transition d'isolant à conducteur, en général réversible.



Project AM-bition



THANK YOU VERY MUCH

[angelaelabs@gmail.com](mailto:angelaelabs@gmail.com)



# Perspectives

- ✓ Dépôt de multicouches carbone/cuivre
- ✓ Poursuivre l'étude des propriétés électriques de la poudre (décharge/ chemins de conduction/ zones conductrice et isolant )