

# Fabrication additive par dépôt direct multi-axes

**Sébastien CAMPOCASSO<sup>a</sup>, Matthieu MUSEAU<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> Université de Toulon, Laboratoire COSMER

<sup>b</sup> Université Grenoble Alpes, Laboratoire G-SCOP



# Plan de la présentation

- 1) Principe des procédés de dépôt direct (DED / DMD)**
- 2) Projection de poudre (LMD-p / CLAD)**
- 3) Procédés de dépôt de fil à l'arc (WAAM)**
- 4) Dépôt de fil robotisé**
- 5) Applications**

# 1) Principe des procédés de dépôt direct (DED / DMD)

2) Projection de poudre (LMD-p / CLAD)

3) Procédés de dépôt de fil à l'arc (WAAM)

4) Dépôt de fil robotisé

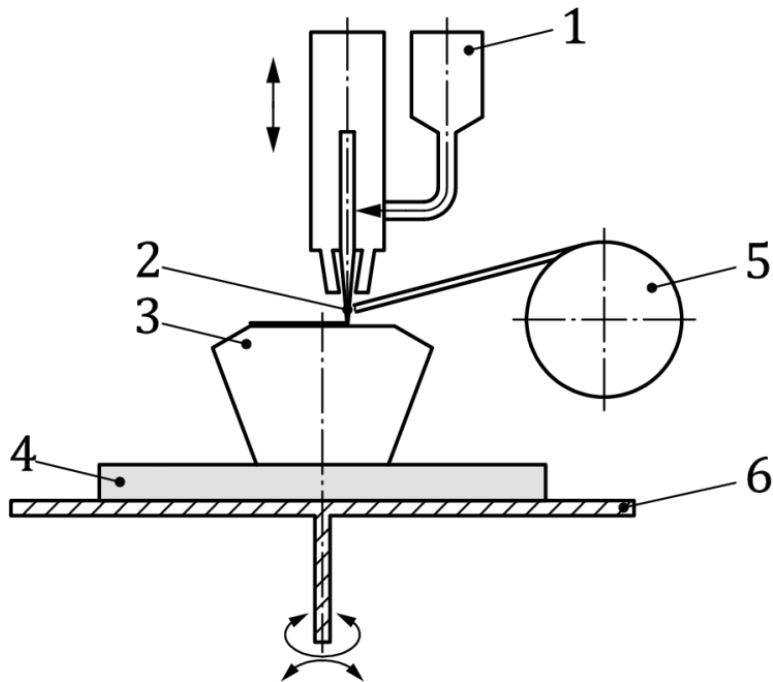
5) Applications

# Dépôt de matière sous énergie concentrée

(*Direct Energy Deposition / Direct Metal Deposition*)

## Définition [ISO17296-2:2015]

Procédé de fabrication additive dans lequel l'énergie thermique focalisée sert à faire fondre les matériaux au fur et à mesure qu'ils se déposent



1. Trémie de poudre
2. Faisceau d'énergie concentrée, par exemple: laser, faisceau d'électrons ou plasma d'arc
3. Produit / Pièce
4. Substrat
5. Bobine de fil (filament)
6. Table de fabrication

Principe du dépôt de matière [ISO17296-2:2015]

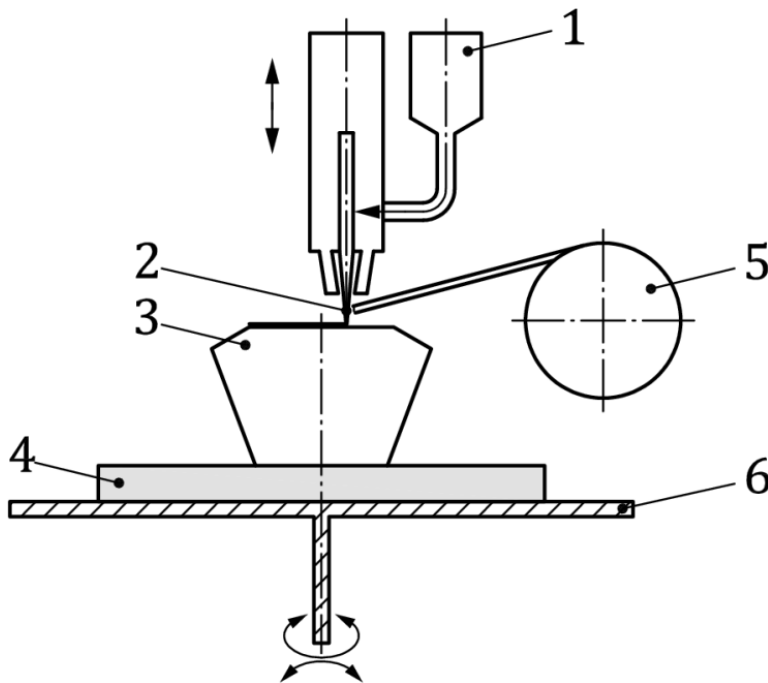
# Éléments technologiques

## Matériau

- Poudre
- Fil

## Porteur

- MOCN 5 axes
- Robot 6 axes
- Robot + vireur 2 axes
- Machine à structure parallèle
- ...



Principe du dépôt de matière [ISO17296-2:2015]

## Source d'énergie

- **Laser**
- Faisceau d'électrons
- Procédés à l'arc :
  - MIG
  - **CMT**
  - TIG
  - Plasma

## Inertisation

- Flux gazeux
- Atmosphère

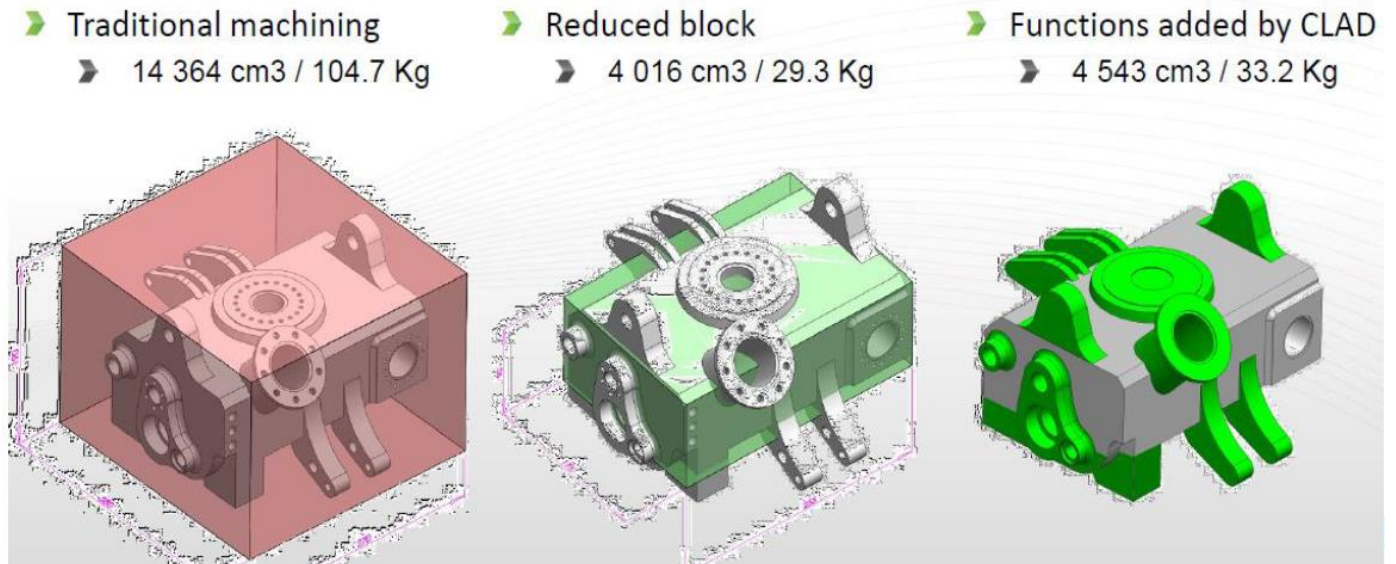
# Intérêts du dépôt direct multi-axes

## Intérêts

- Fabrication sans supports + pas de dépoudrage
- Fabrication hybride : additive + « soustractive »
- Peu d'immobilisation matériau / Lit de poudre
- Reprise de pièces :
  - Ajout de fonctions (bossages...)
  - Maintenance

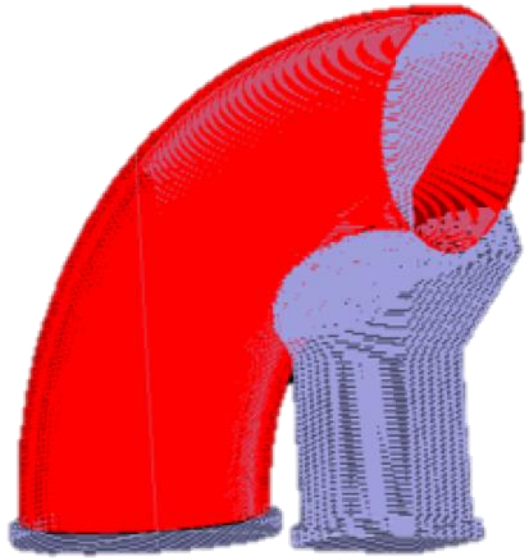


[DMG]

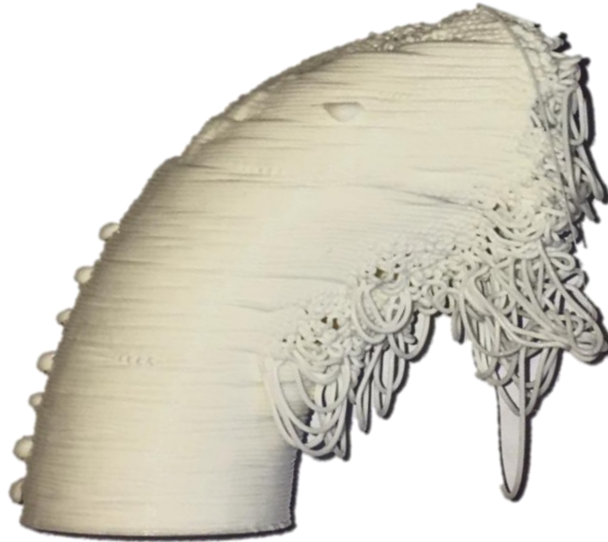


Principe de l'ajout d'entités [Frechard 2015]

# Intérêts du dépôt direct multi-axes - Exemple



Supports = 136 % volume pièce



Fabrication 2,5D  
sans supports



Fabrication multi-axes  
sans supports

Suppression des supports de fabrication [Chalvin 2017]

1) Principe des procédés de dépôt direct (DED / DMD)

**2) Projection de poudre (LMD-p / CLAD)**

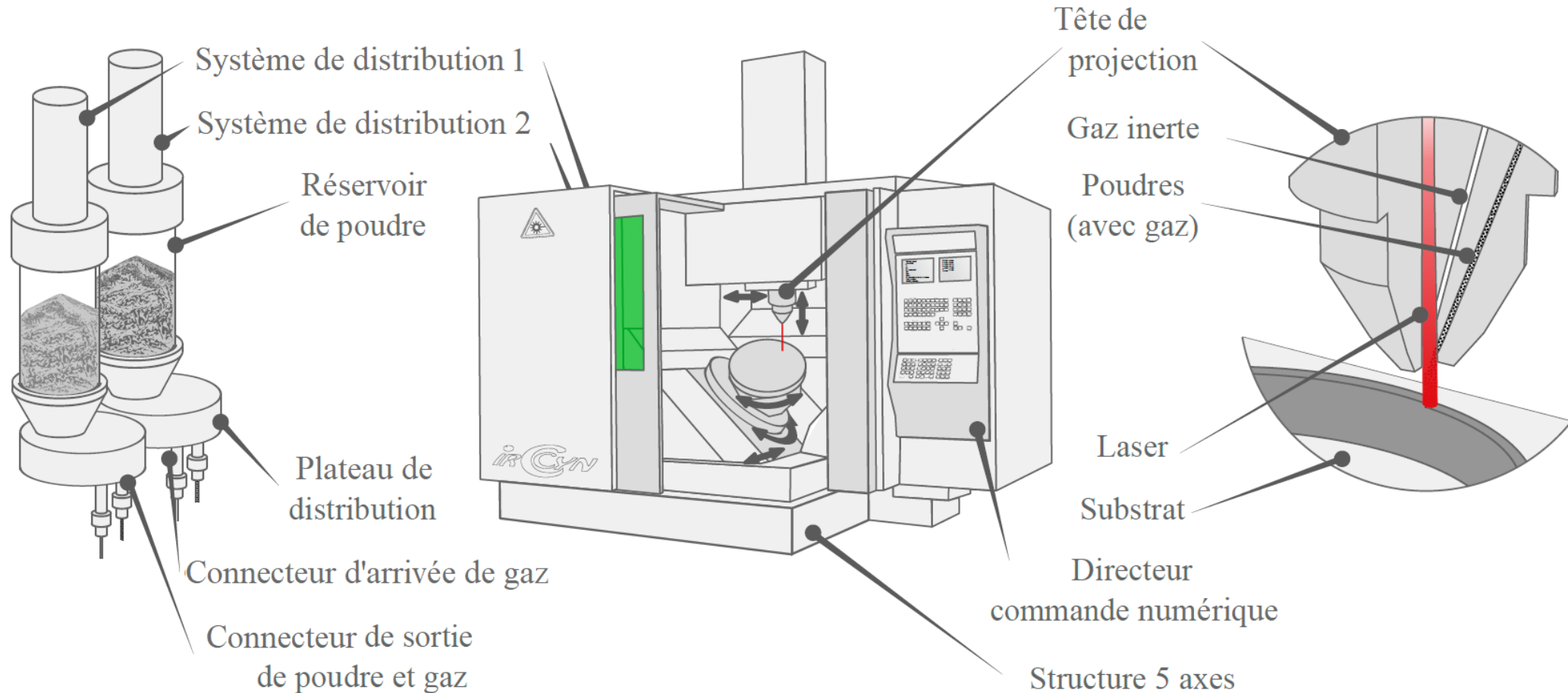
3) Procédés de dépôt de fil à l'arc (WAAM)

4) Dépôt de fil robotisé

5) Applications

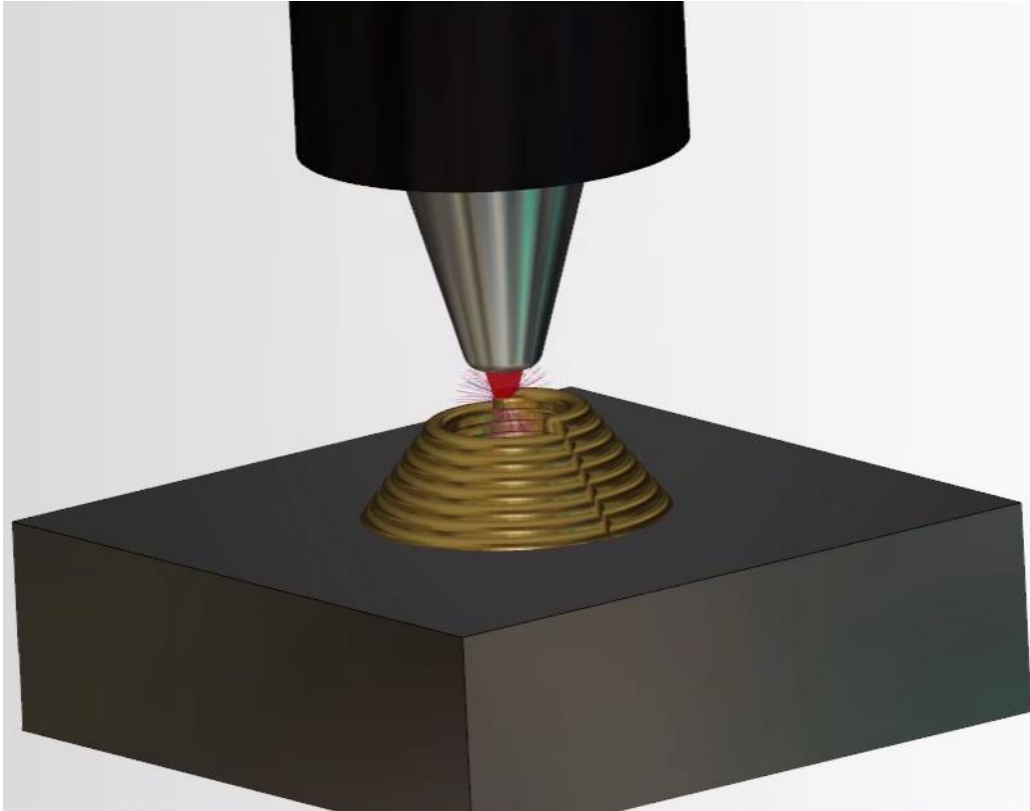


# Projection de poudre (Laser Metal Deposition-powder)

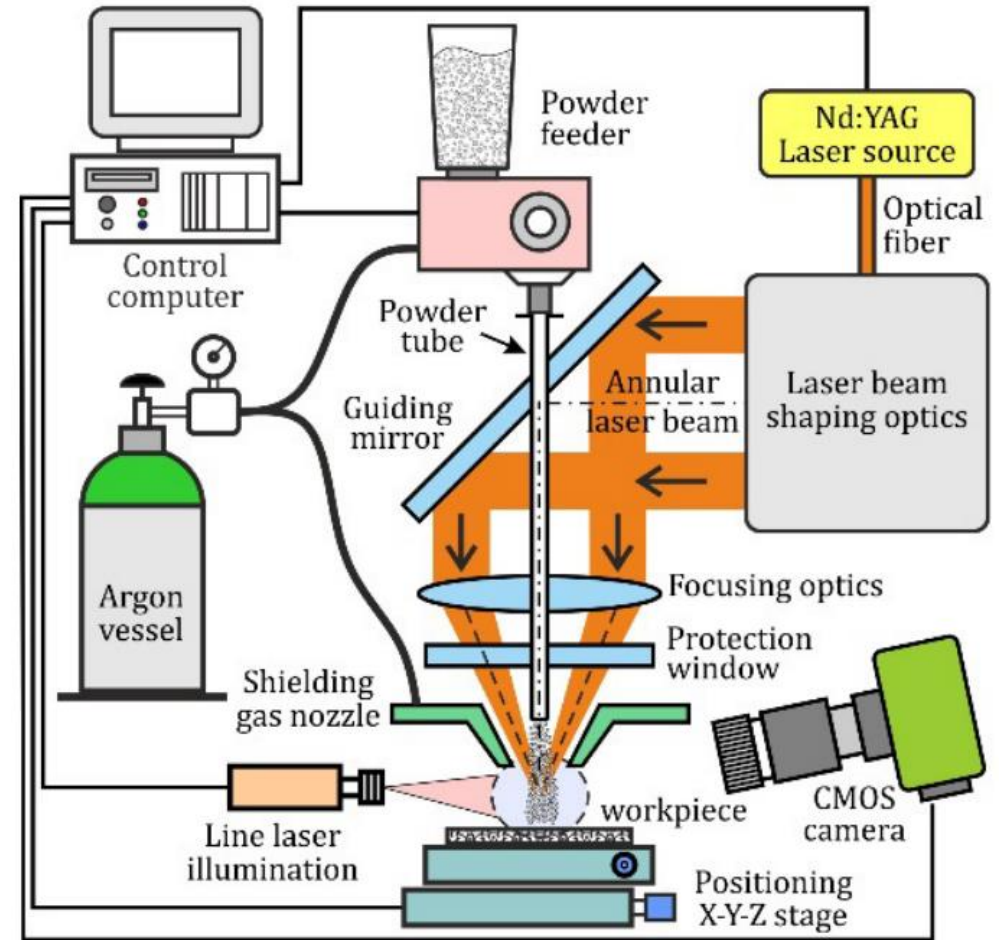


Principe d'une machine 5 axes de projection de poudre [Muller 2013]

# Projection de poudre

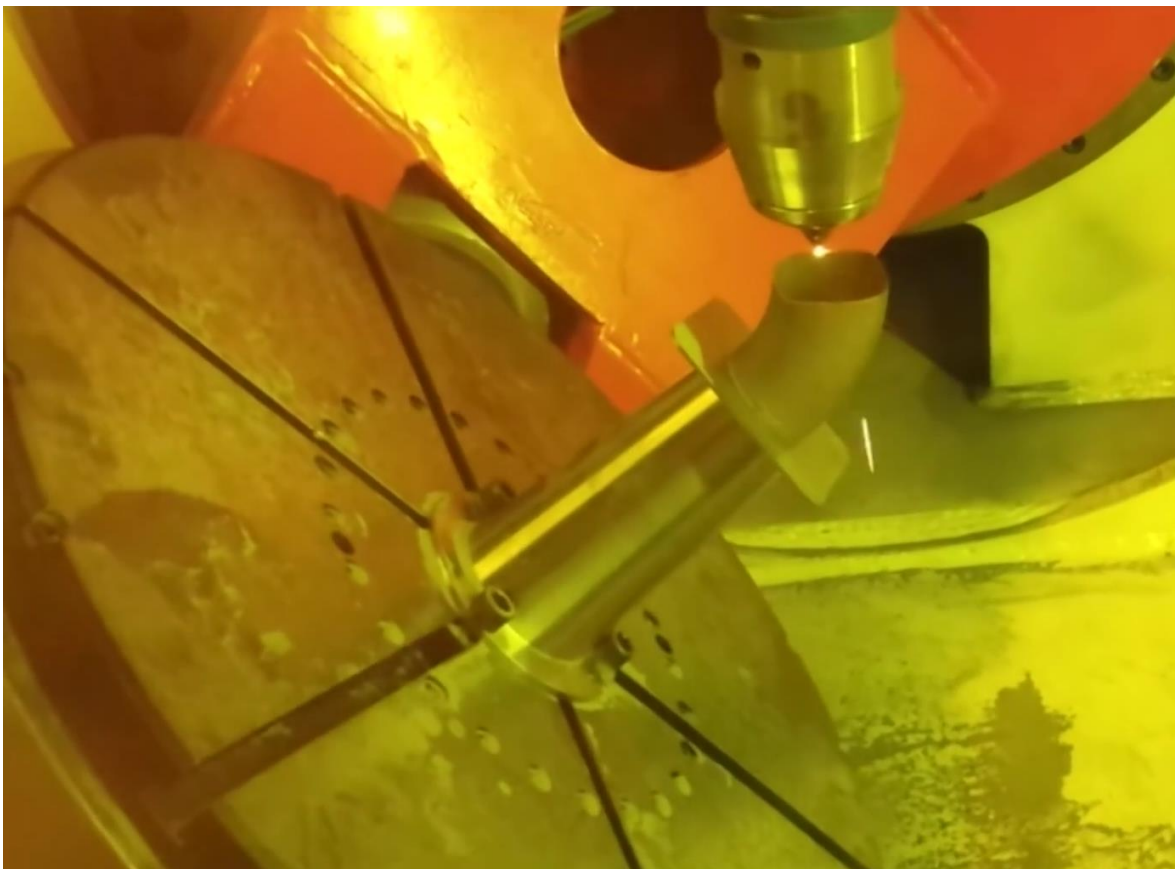


Simulation (FAO) d'un dépôt [MODULE WORKS]



Buse avec faisceau laser "annulaire" [Kuznetsov 2016]

# Projection de poudre



Exemple de fabrication par projection de poudre [BeAM]

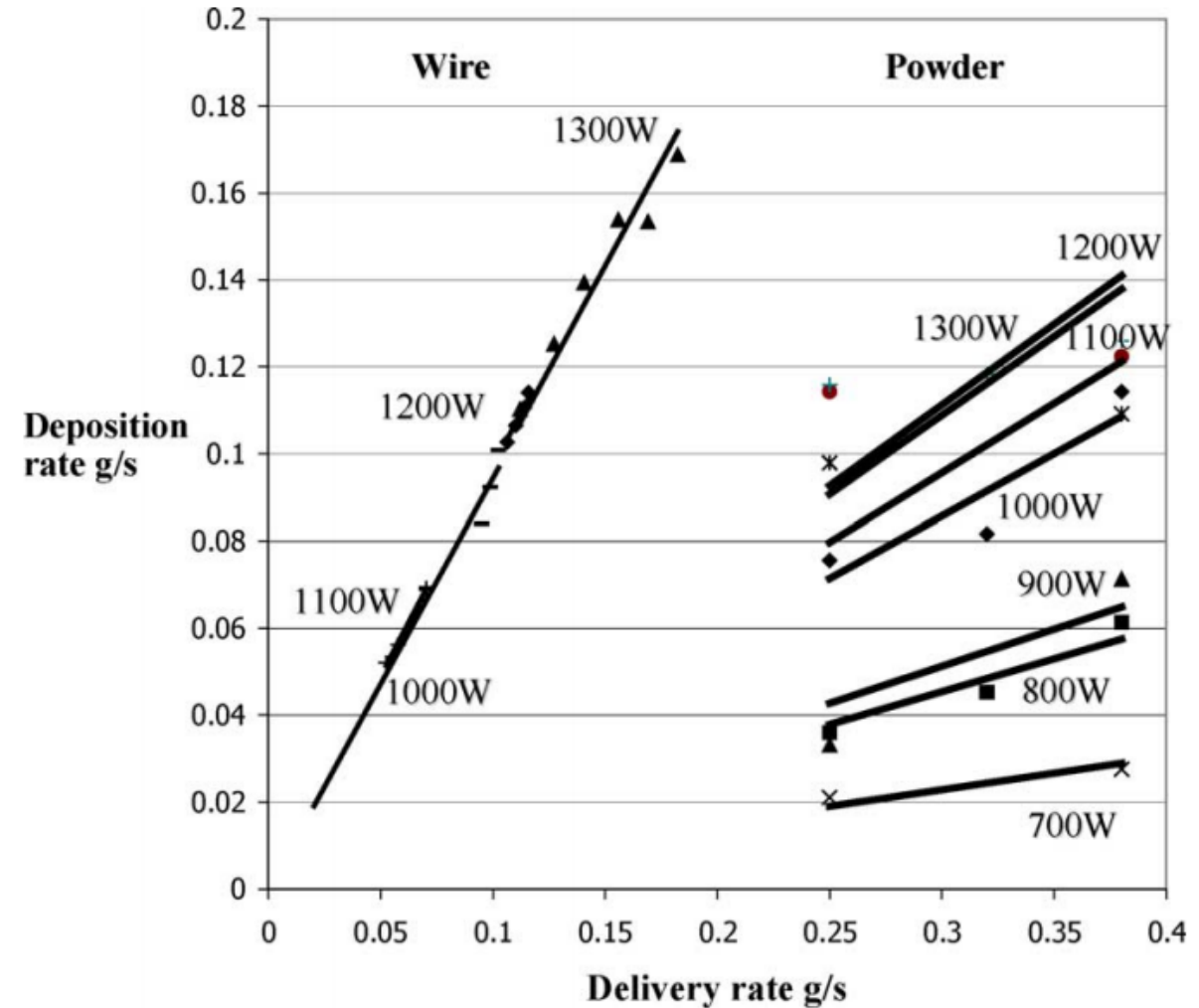


## Difficultés

- Inertie du flux de poudre
- Génération de trajectoires multi-axes :
  - Sans collisions
  - Maintien du bain liquide / gravité
  - Variation de la vitesse de dépôt
  - ...
- Protection des organes de la MOCN

# Métal d'apport sous forme de poudre : limites

- Obtention des poudres :
  - Onéreux
  - Impactant sur l'environnement
- Changement de matériaux délicat
- Utilisation des poudres :
  - Faible taux de transfert sur la pièce
  - Santé des opérateurs ?

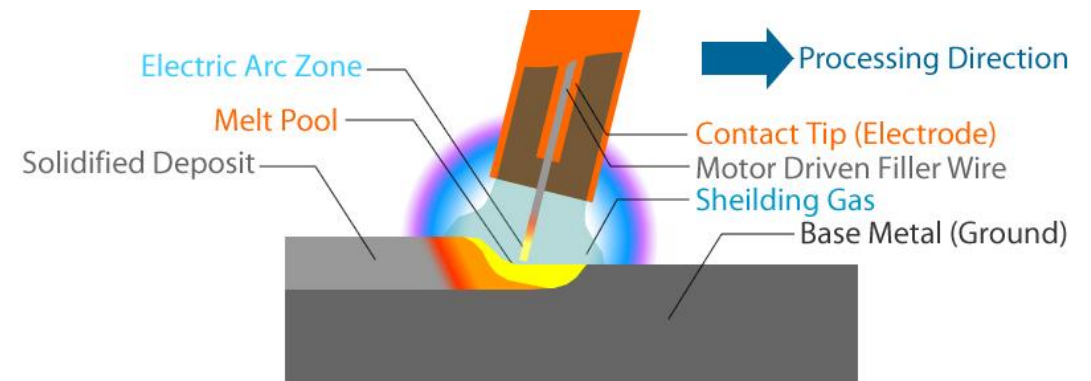
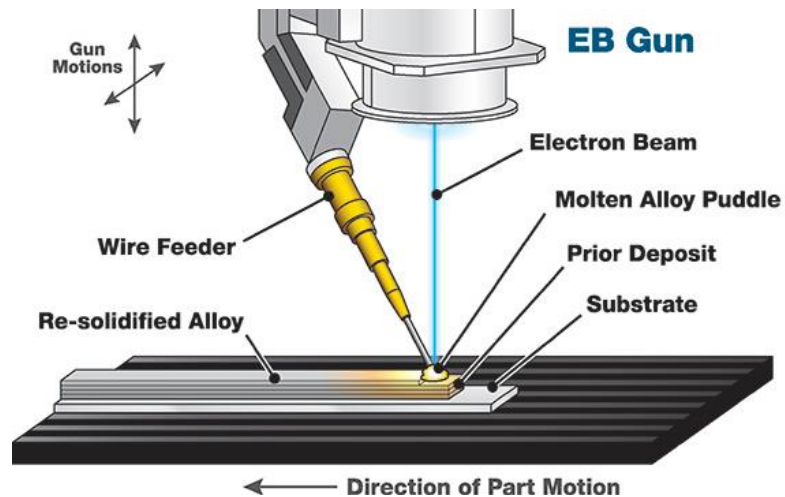


Taux de dépôt vs. Taux d'alimentation [Syed 2005]

- 1) Principe des procédés de dépôt direct (DED / DMD)
- 2) Projection de poudre (LMD-p / CLAD)
- 3) Procédés de dépôt de fil à l'arc (WAAM)**
- 4) Dépôt de fil robotisé
- 5) Applications

# Métal d'apport sous forme de fil

- Faisceau laser ou électrons (SCIAKY) → Technologie onéreuse
- Utilisation d'un arc électrique : WAAM (*Wire and Arc Additive Manufacturing*)
  - Différentes technologies:
    - Gas Tungsten Arc Welding (TIG)
    - Plasma Wire Deposition (PWD)
    - **Gas Metal Arc Welding (GMAW / MIG)**



Dépôt de fil métallique avec faisceau d'électrons [SCIAKY]

Procédé GMAW/MIG



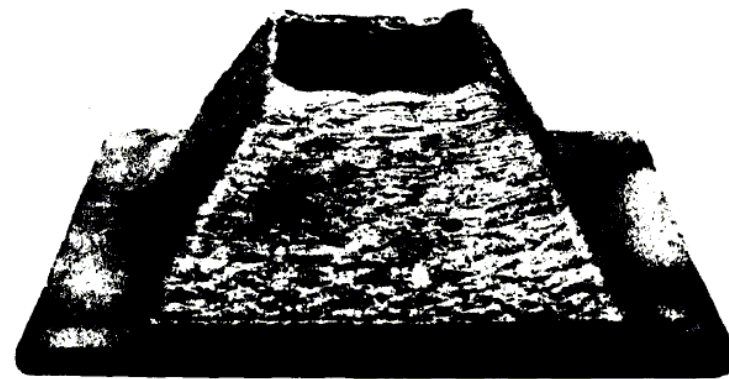
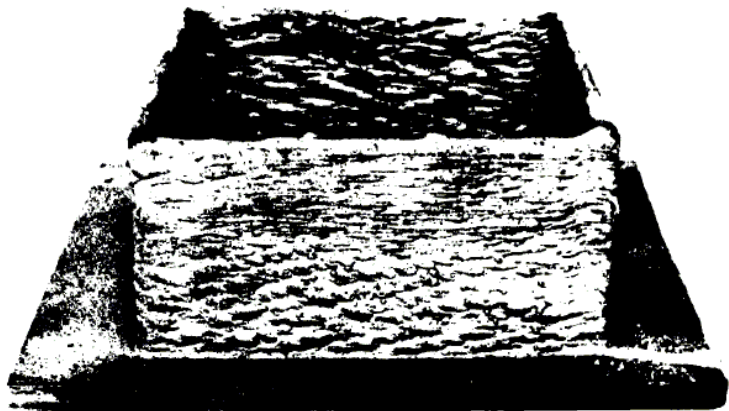
# Procédés WAAM

## Avantages

- Procédés connus et maîtrisés industriellement
- Bon maintien du bain liquide
- Vitesse de dépôt importante
- Peu de porosités
- Changement de matériau rapide !

## Inconvénients

- Maintien de l'arc indispensable
- Largeur de cordon
- Distorsions de la pièce
- Projections

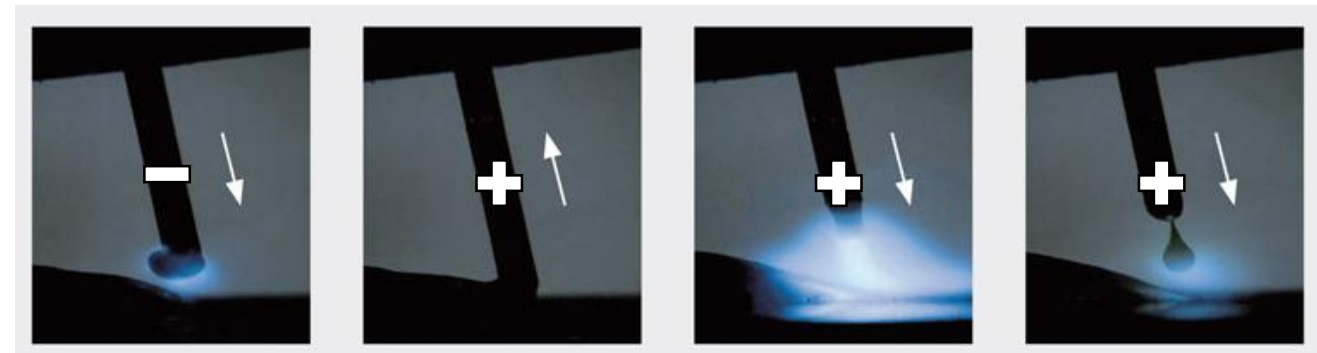
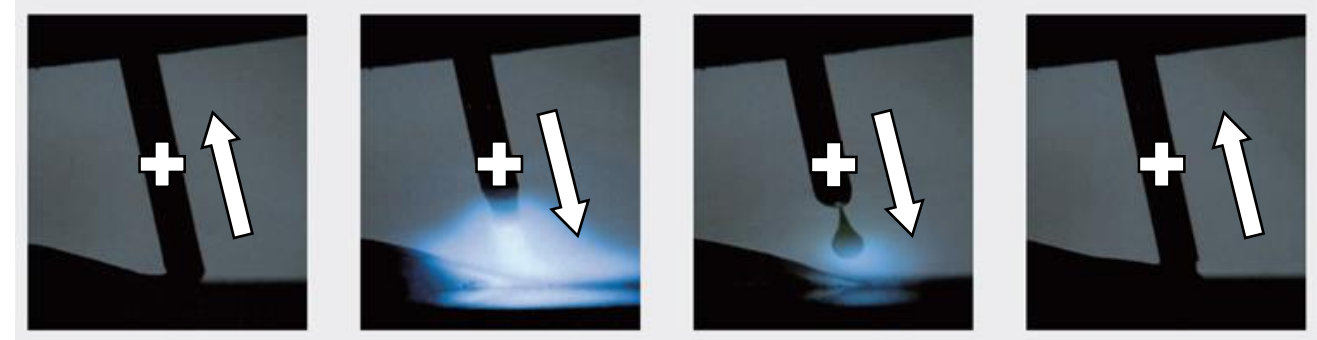
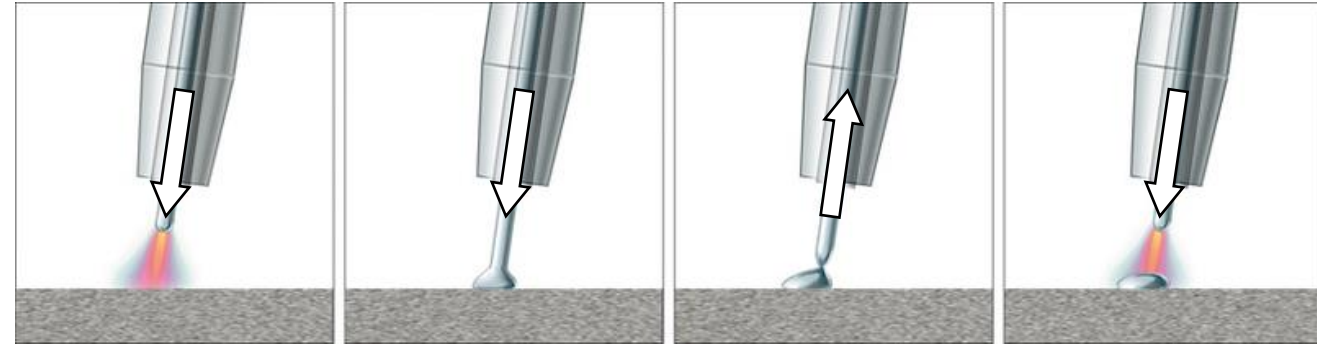


Essais de prototypage basés sur un procédé de soudure à l'arc [Dickens 1992]

# Procédé CMT de Fronius

(Cold Metal Transfer)

- Une variante du MIG :  
Intensité limitée pendant le court-circuit
- Détachement de la goutte
  - Par mouvement du fil (70-120 Hz)
  - Par cycles d'impulsions
  - Par alternance de polarités





# Avantages du CMT

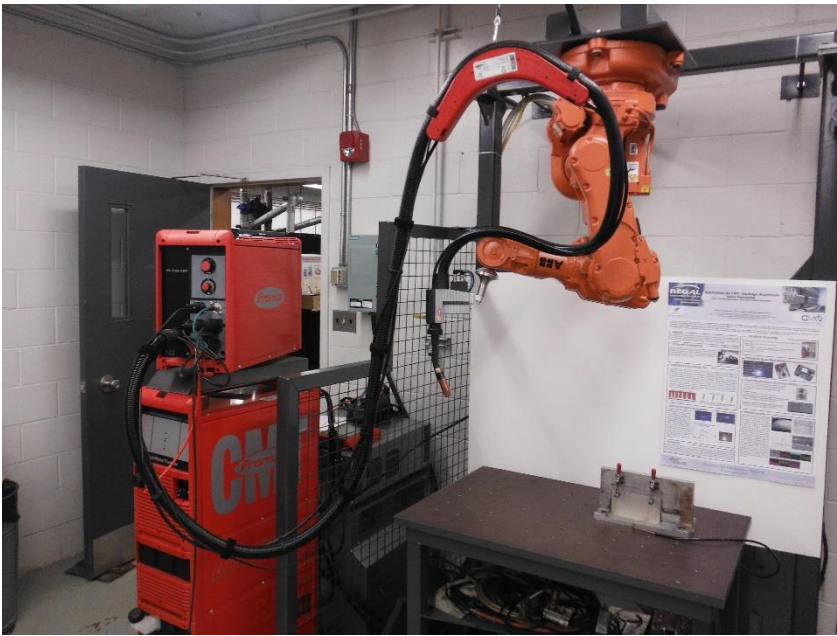
- Stabilité du procédé "automatique"
- Limitation de l'apport de chaleur
- Réduction des projections
- Dépôt de métaux variés (Acier, Al, Ti...)
  
- Taux de dépôt > 99 %
- Vitesse de dépôt élevée

Technique	Deposition rate (kg/h)
SLM	0,06 – 0,120
EBM	0,24 – 0,36
TIG WAAM	1,5
PWD WAAM	1,8
CMT WAAM	2,6

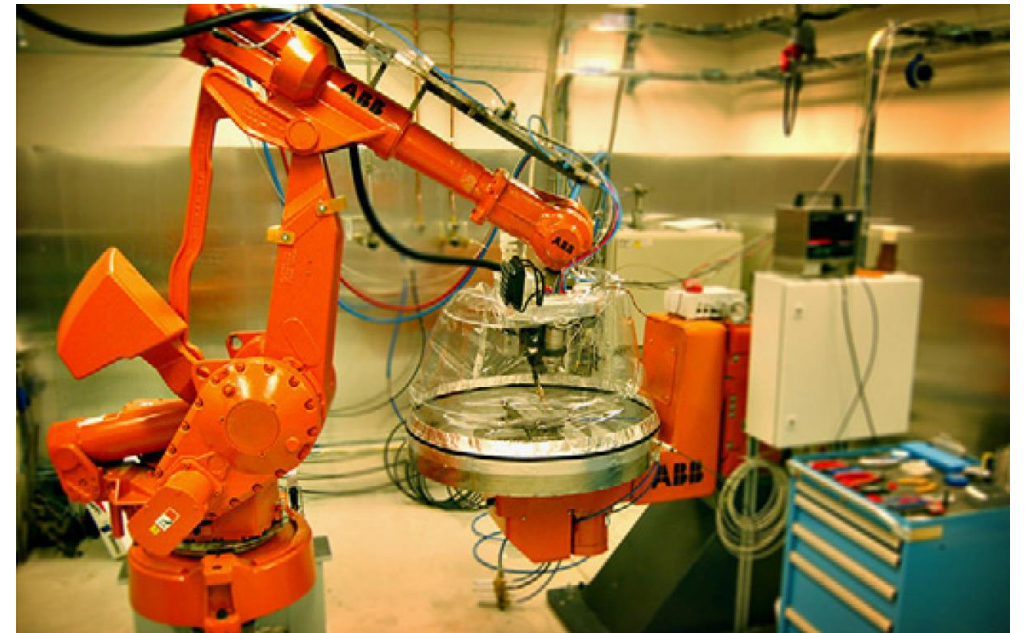
# Mise en œuvre du dépôt

WAAM : torche dans le « plan de dépôt » ( $\vec{t}$ ,  $\vec{b}$ )

→ Porteur avec au moins 5 axes



Cellule robotisée CMT [CEGEP/CMQ]



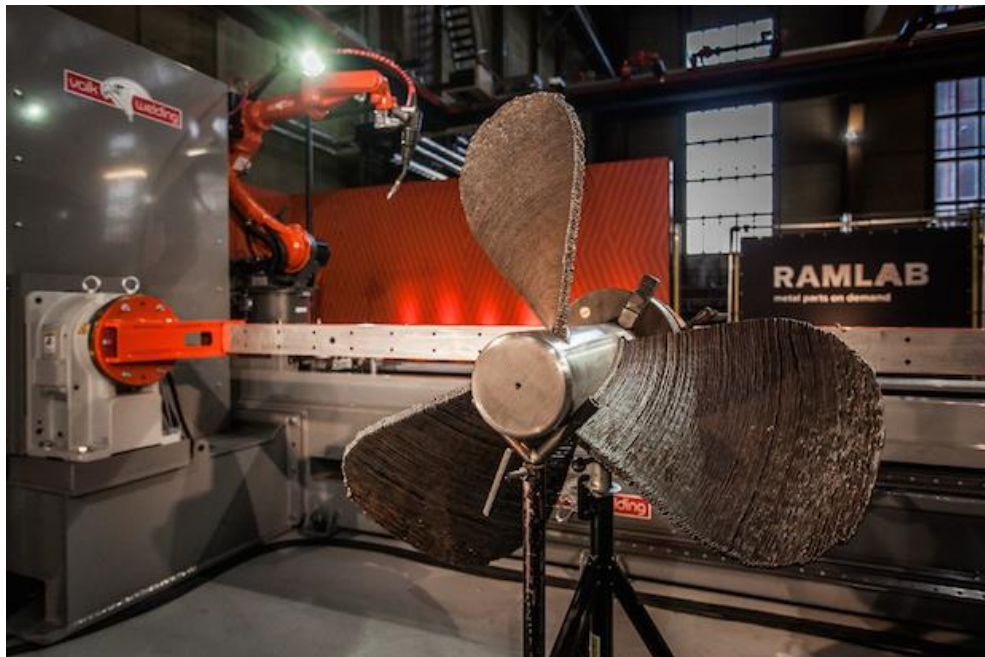
Cellule robotisée avec laser et atmosphère inerte [Heralic 2012]

- 1) Principe des procédés de dépôt direct (DED / DMD)
- 2) Projection de poudre (LMD-p / CLAD)
- 3) Procédés de dépôt de fil à l'arc (WAAM)
- 4) Dépôt de fil robotisé**
- 5) Applications

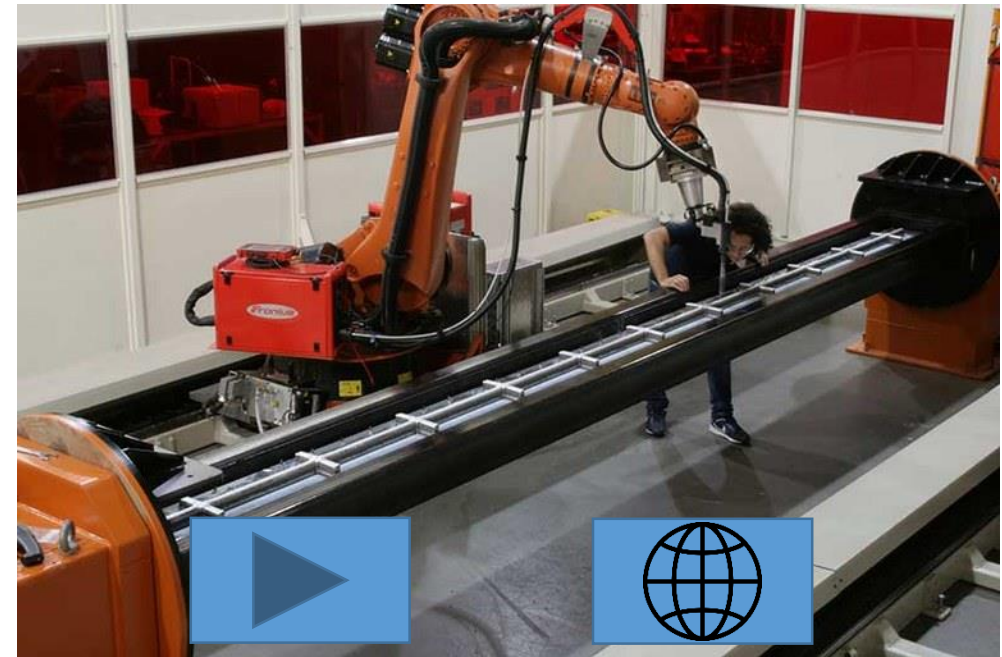
# Dépôt de fil robotisé

## Intérêts

- Grandes dimensions
- Bonne productivité
- Faible coût
- Risques HSE connus



Hélice marine de 180 kg [RAMLAB/AUTODESK]



Pièce aéronautique de 6 m de long [CRANFIELD WAAM]

# Procédé à faible coûts

- **Investissement  $\approx$  135 k€ TTC :**  
Source CMT + Actionneur (robot) + Positionneur + Intégration
- **Consommables :**
  - **Fil :** 15 kg acier  $\approx$  300 € ; 7 kg aluminium  $\approx$  70 €
  - **Gaz :** 2,3 m<sup>3</sup>  $\approx$  300 € (consommation  $\approx$  20 L/min)
- **Maintenance :** 2500 €/an (hors pièces)



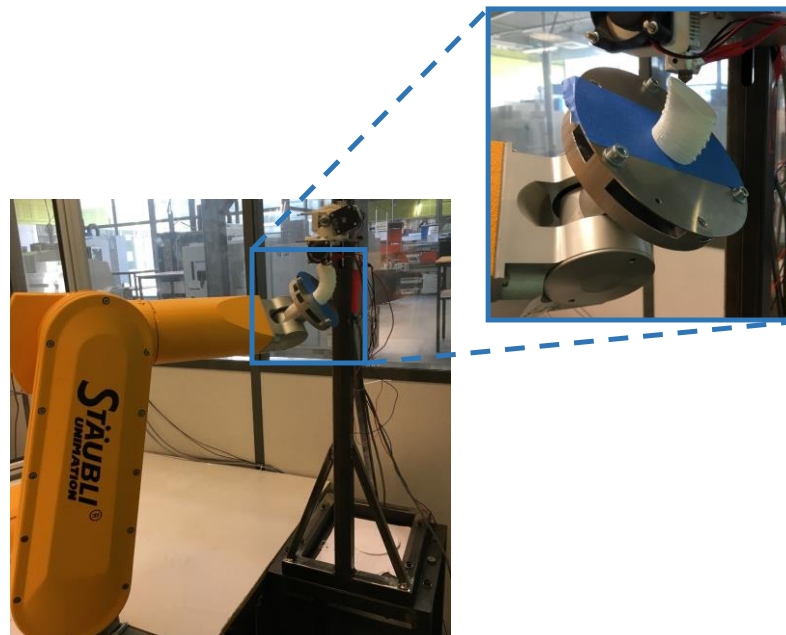
# Configurations possibles

Torche mobile / Pièce fixe	Pièce mobile / Torche fixe	Pièce et torche mobile
<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ Grandes dimensions</li> <li>⊖ Formes peu complexes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ Formes complexes sans supports</li> <li>⊕ Gestion de la gravité (bain de fusion)</li> <li>⊖ Dimensions limitées (masse)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ Accessibilité optimale</li> <li>⊖ Coût</li> <li>⊖ 8 axes à piloter</li> </ul>



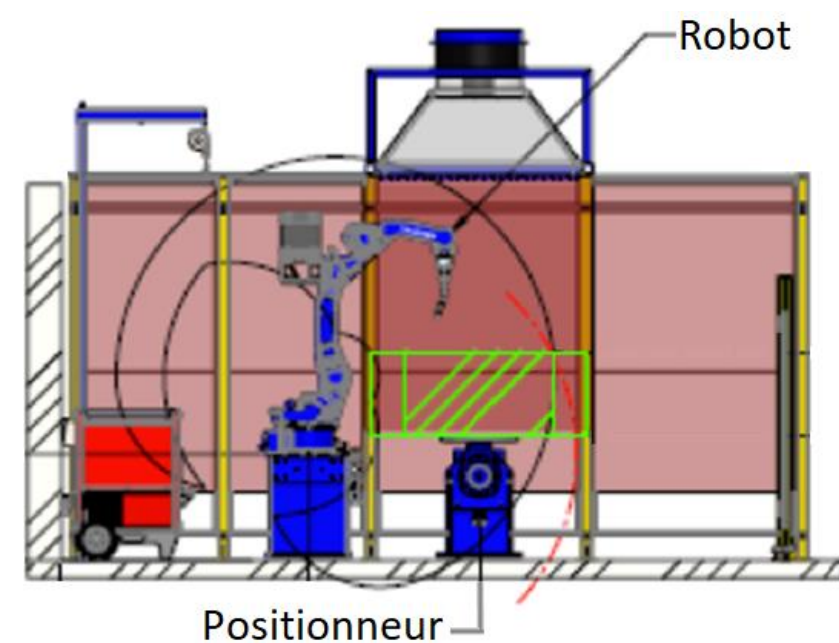
Torche mobile [DELCAM]

12/09/2017, Carqueiranne



Pièce mobile [Chalvin 2017]

ANF CNRS "Procédés de fabrication additive : règles et méthodes"

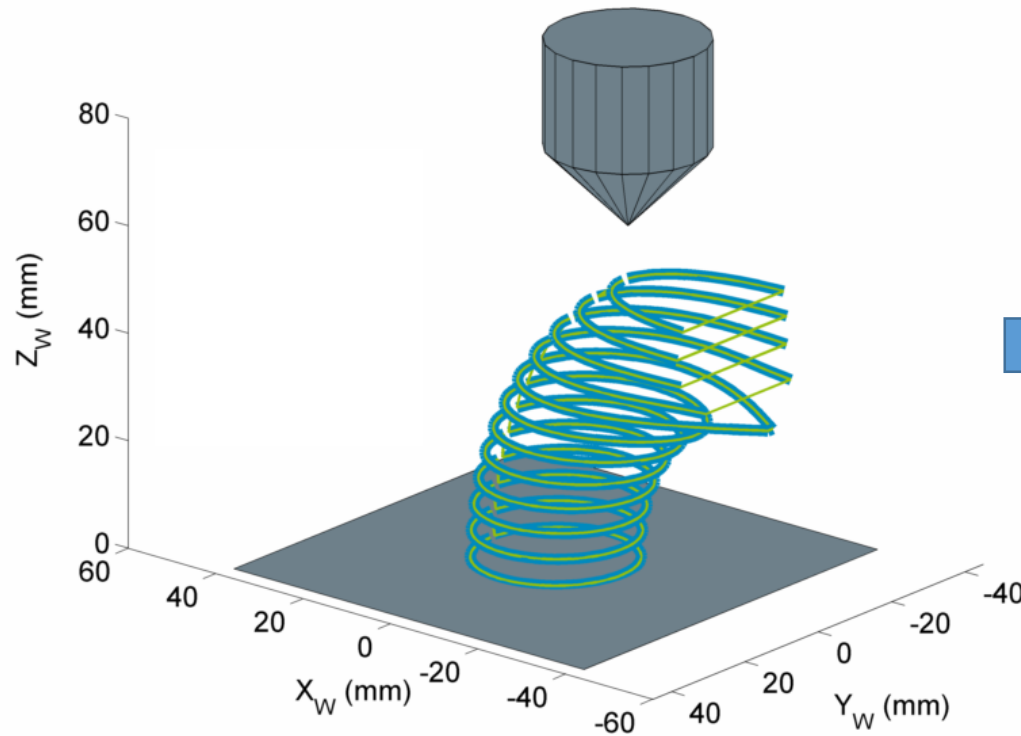


Robot 6 axes + Vireur 2 axes [YASKAWA]

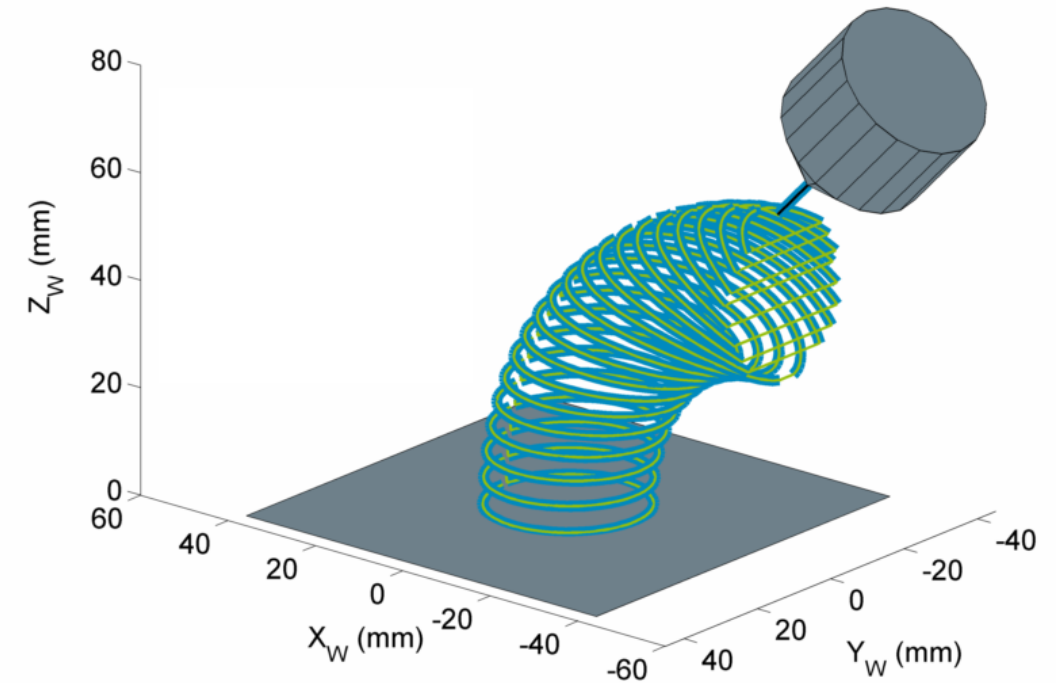
22 / 36

# Evolution des trajectoires : 2,5D $\rightarrow$ multi-axes

Conventional 2.5D sliced path



3D deposition path for multi-axis robots



Comparaison de deux trajectoires dans le repère pièce [Campocasso 2017]

# Minimisation des distorsions : Fabrication symétrique



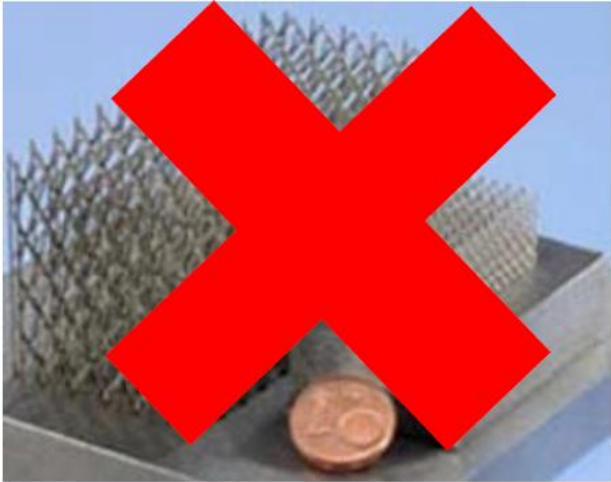
Exemple de deux pièces en acier fabriquées symétriquement sur le plateau [Addison 2015]



- 1) Principe des procédés de dépôt direct (DED / DMD)
- 2) Projection de poudre (LMD-p / CLAD)
- 3) Procédés de dépôt de fil à l'arc (WAAM)
- 4) Dépôt de fil robotisé

## **5) Applications**

# Quelles applications pour le dépôt direct ?

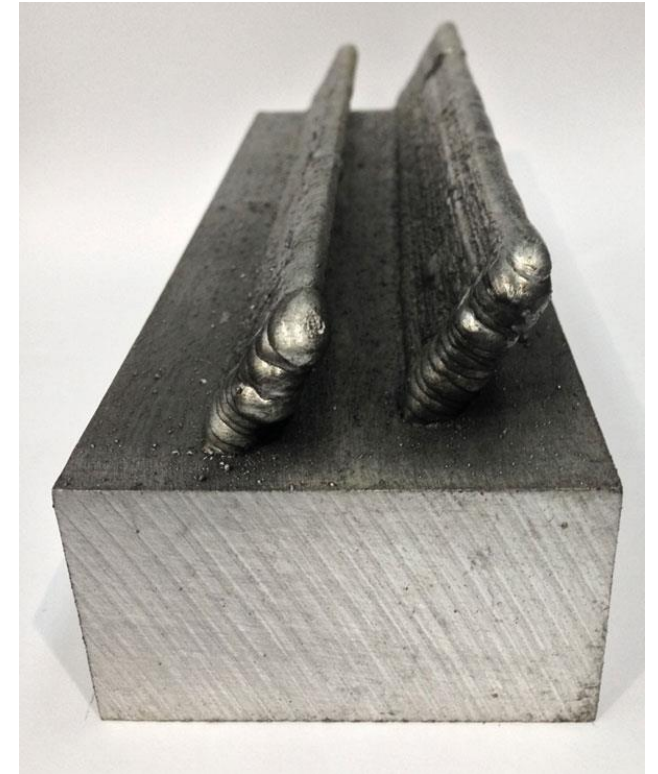


[Addison 2015]

## **Fabrication de pièces brutes de grandes dimensions :**

- Gain de matière
- Diminution du coût
- Réduction du temps de fabrication
- Formes moyennement complexes
- Faible qualité dimensionnelle

# WAAM – Pièces de démonstration



Pièces de démonstration [FRONIUS]

# Ebauches de pièces complexes en matériaux "durs"



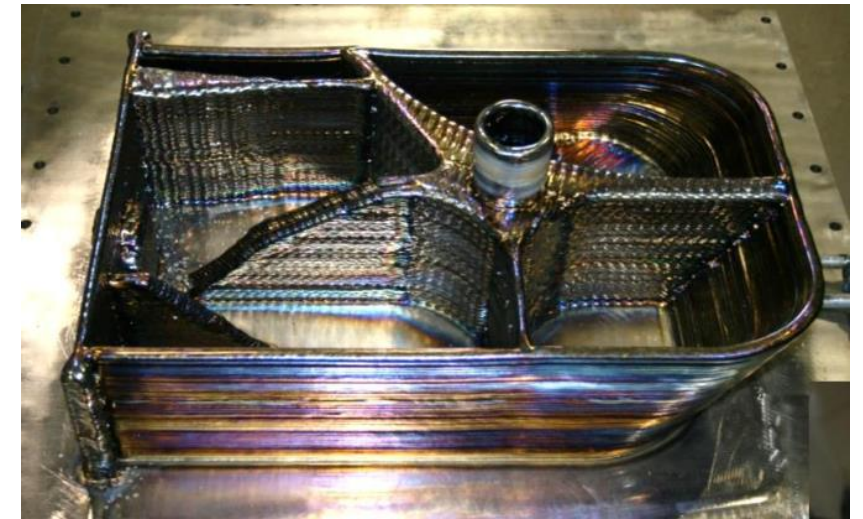
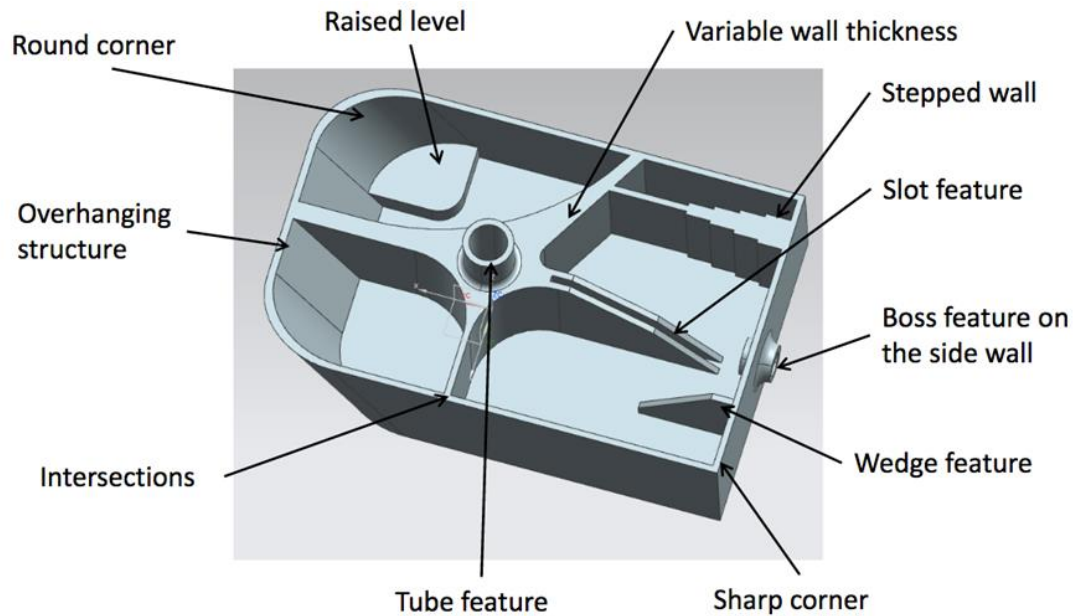
- Temps de fabrication : 2 jours
- Epaisseur mini : 4.4 mm
  
- Masse finale de la pièce : 1.43 kg
- Usinage dans la masse :
  - Brut : 53 kg
  - BTF = 37:1
- Dépôt de fil :
  - Brut : 9 kg (avec plateau)
  - BTF = 6.3:1

Ebauches de pièces aéronautiques en alliages de titane [Addison 2015]



# Ebauches de pièces complexes en matériaux "durs"

- Temps de fabrication : 2 semaines
- Masse finale de la pièce : 40 kg
- BTF = 1.3:1



Ebauches de pièces aéronautiques en alliages de titane [Addison 2015]

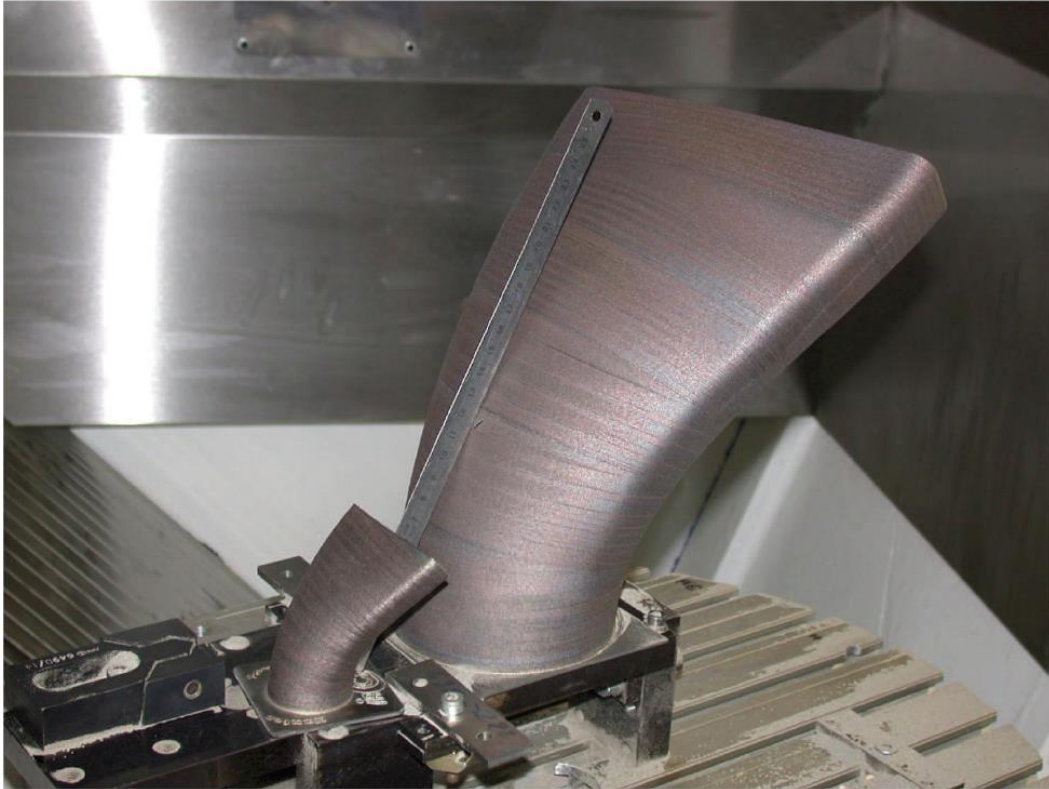
# Ajout de fonctions à une pièce



Ajout de matière sur un disque central forgé [Appelyard 2012]

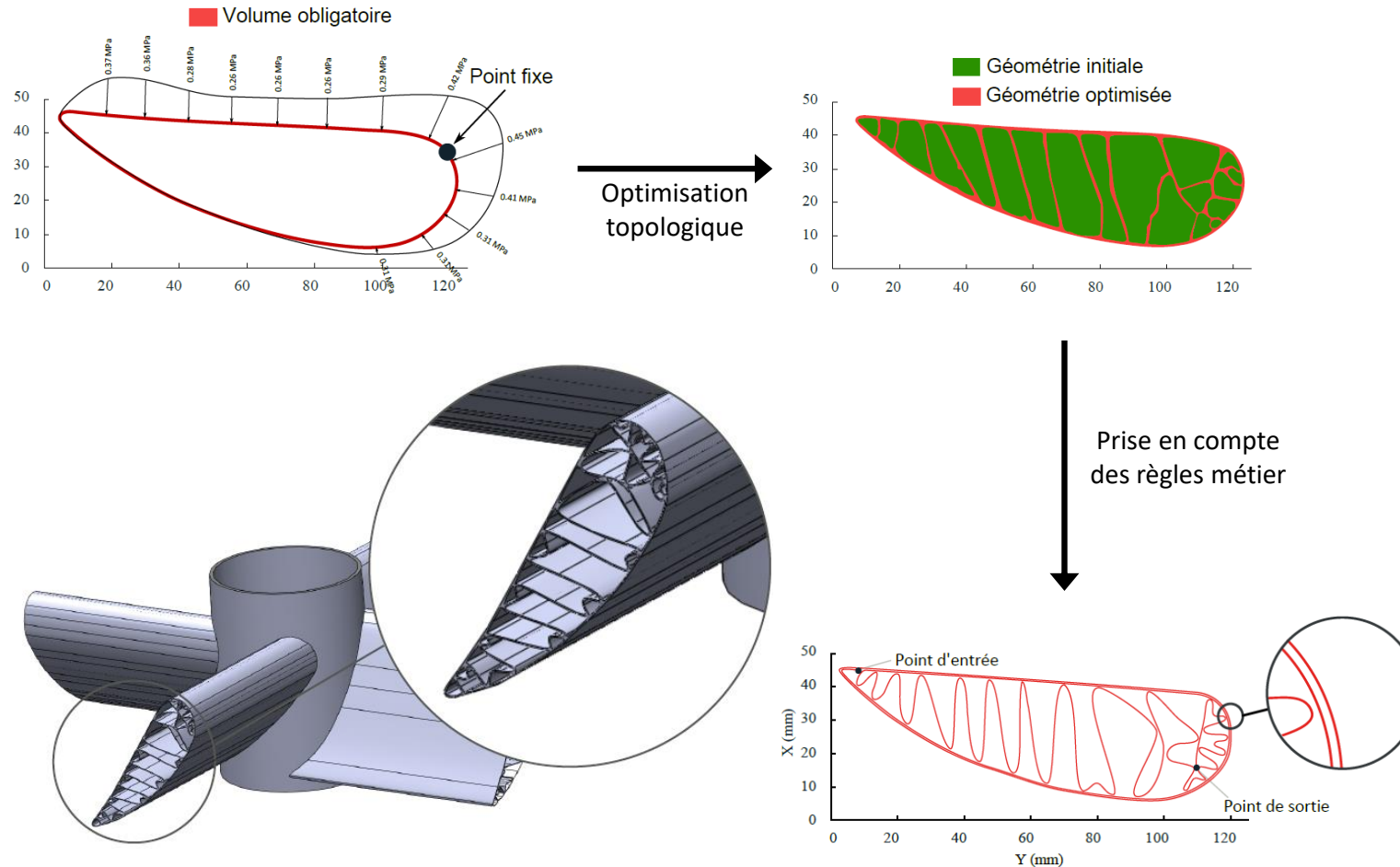


# Projection de poudre – Exemples



Conduits aéronautiques obtenus par projection de poudres [Le Bourhis 2014]

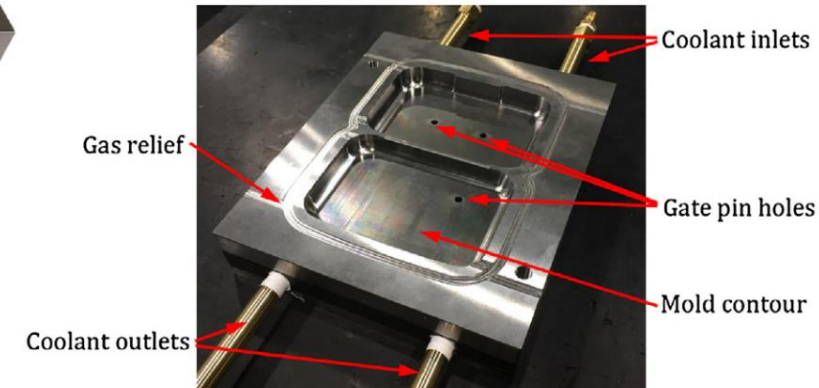
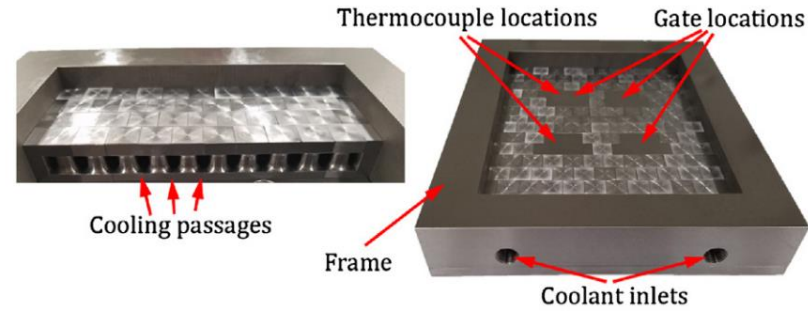
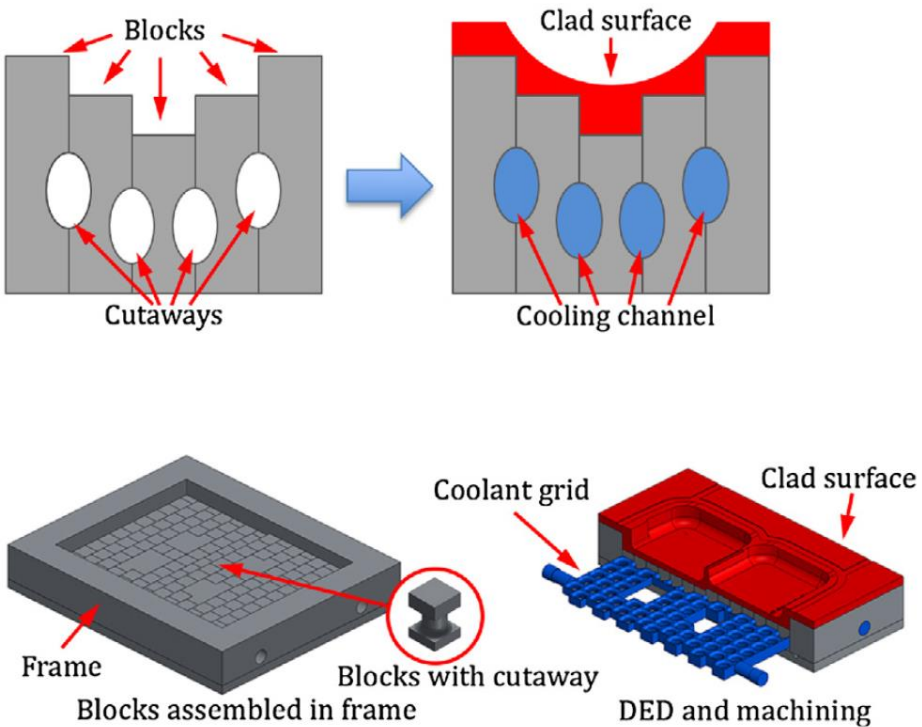
# Projection de poudre – Optimisation



Exemple de pièce optimisée obtenable par projection de poudres [Ponche 2013]

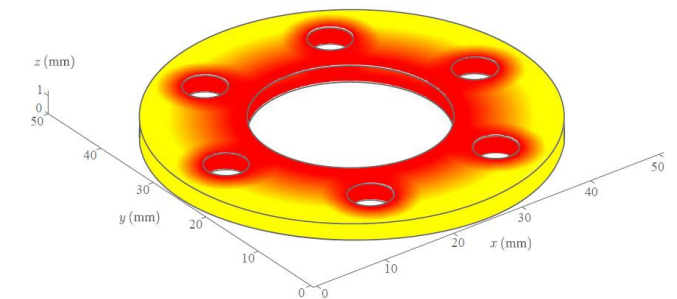
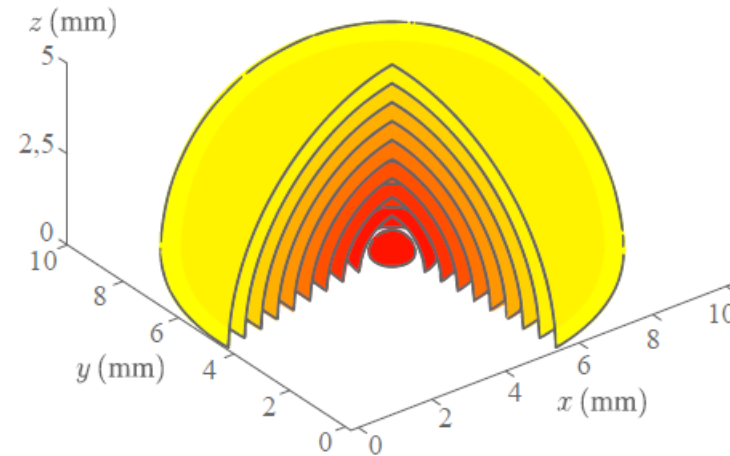
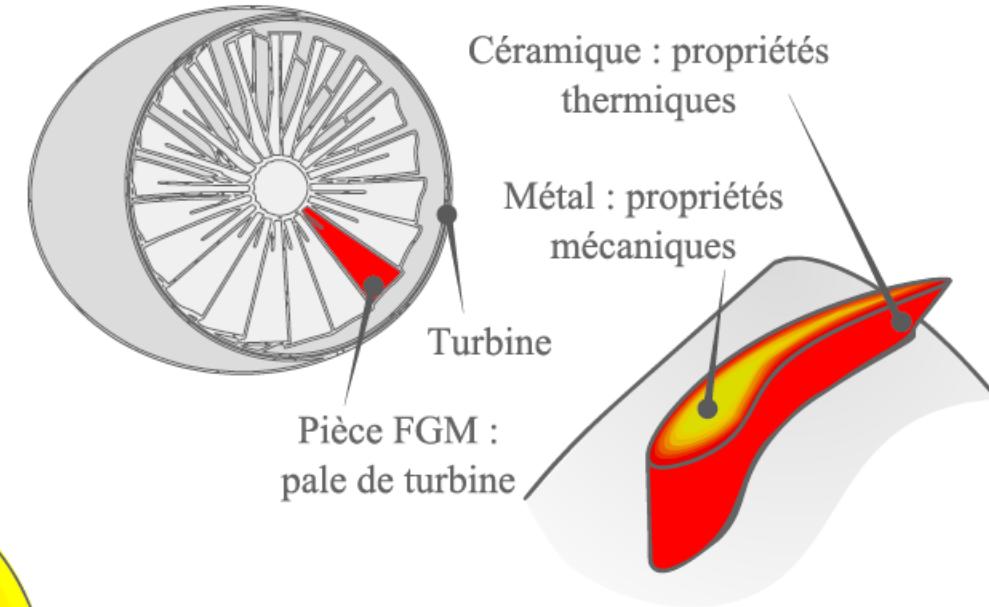
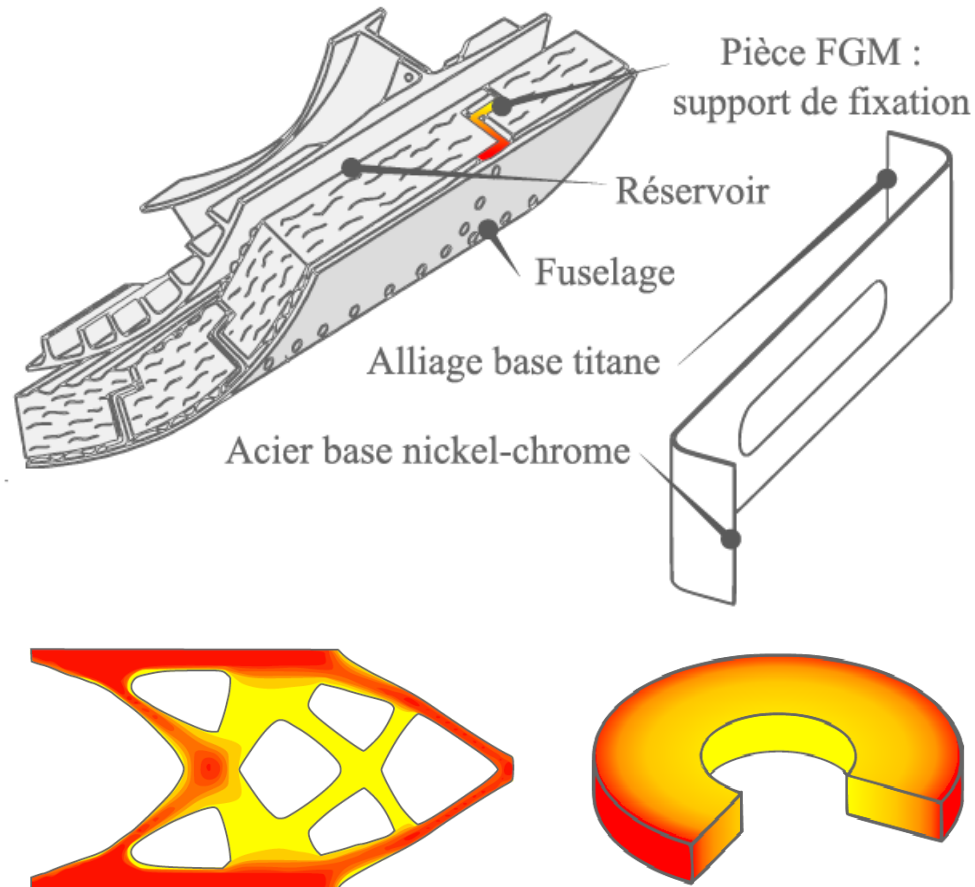


# Fabrication hybride de moules



Empreinte de moule déposée par projection de poudre sur des blocs [Soshi 2017]

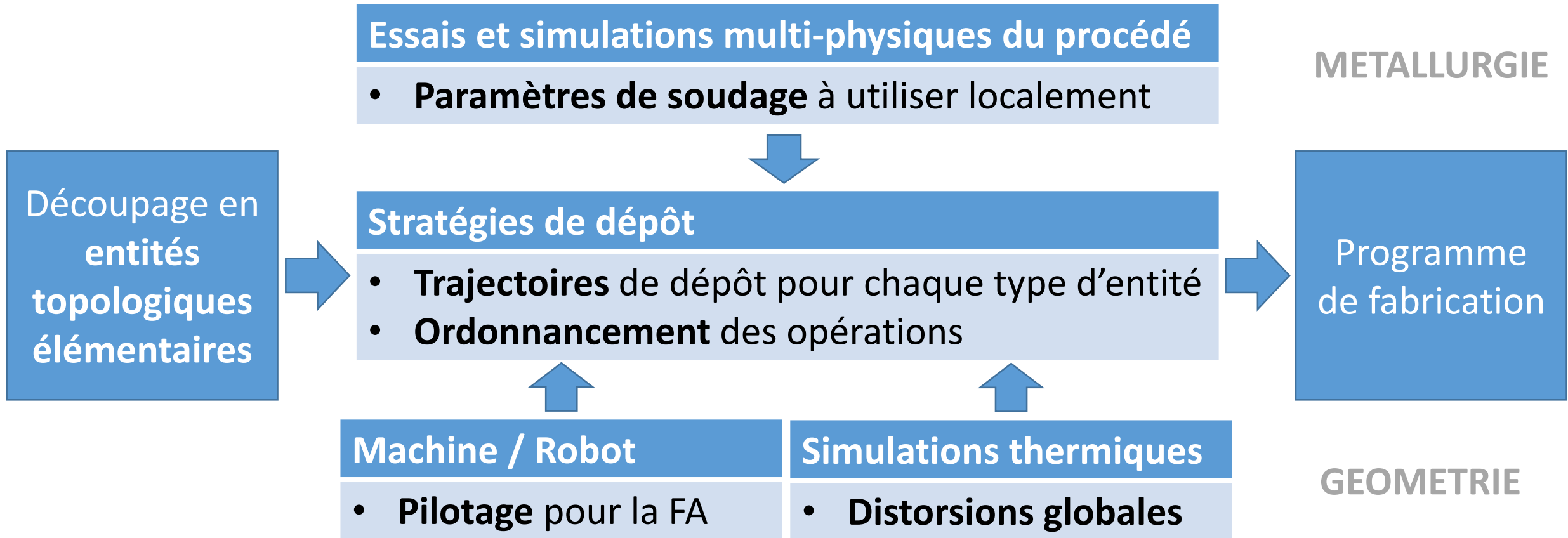
# Pièces multi-matériaux



Exemples de répartitions de deux matériaux en projection de poudres [Muller 2013]

# Conclusion et perspectives

- Actuellement : réalisation de pièces **prototypes par essais-erreurs**
- **Expertise et logiciels FAO à développer** → Transfert vers l'industrie



# Merci de votre attention

**Sébastien CAMPOCASSO**

[sebastien.campocasso@univ-tln.fr](mailto:sebastien.campocasso@univ-tln.fr)

**Matthieu MUSEAU**

[matthieu.museau@g-scop.fr](mailto:matthieu.museau@g-scop.fr)



# Références (1)

- [Appelyard 2012] D. Appelyard, *Welding pelton runners*. HRW-Hydro Review Worldwide, 2012.
- [Addison 2015] A. Addison, J. Ding, F. Martina, H. Lockett, S. Williams. *Manufacture of complex titanium parts using Wire + Arc Additive Manufacture*. Conference Titanium Europe 2015, 2015.
- [Campocasso 2017] S. Campocasso, V. Hugel, B. Vayre. *Génération de trajectoires pour la fabrication additive par dépôt de fil robotisé multi-axes - Application à une tubulure torique*. 15ème Colloque national AIP-Primeca, 2017.
- [Chalvin 2017] M. Chalvin. *Développement d'un moyen de fabrication additive multi-axes permettant la fabrication de géométries complexes sans utilisation de matériau support*. Master, Université de Toulon, 2017.
- [Dickens 1992] P.M. Dickens, M.S. Pridham, R.C. Cobb, I. Gibson, G. Dixon. *Rapid prototyping using 3-D welding*. Proceedings of the 3rd Symposium Solid Freedom Fabrication, Austin, Texas, pp. 280-290, 1992.
- [Frechard 2015] J. Frechard. *CLAD Process to build and repair aeronautic parts*. Assises Européennes de la Fabrication Additive, 2015.
- [Heralic 2012] A. Heralic, A. K. Christiansson & B. Lennartson. *Height control of laser metal-wire deposition based on iterative learning control and 3D scanning*. Optics and Lasers in Engineering, Vol. 50, pp. 1230–1241, 2012.
- [ISO17296-2:2015] *Fabrication additive – Principes généraux – Partie 2: Vue d'ensemble des catégories de procédés et des matières premières*. Norme ISO 17296, 2015.

# Références (2)

- [Kuznetsov 2016] A. Kuznetsov, A. Jeromen, G. Levy, M. Fujishima, E. Govekar. *Annular laser beam cladding process feasibility study*. Physics Procedia, Vol. 83, pp. 647-656, 2016.
- [Le Bourhis 2014] F. Le Bourhis. *Modélisation de la performance environnementale des procédés de fabrication par ajout de matière Application à la projection de poudres métalliques*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale Nantes, 2014.
- [Muller 2013] P. Muller. *Fabrication additive de pièces multimatériaux*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2013.
- [Paris 2016] H. Paris, H. Mokhtarian, E. Coatanéa, M. Museau, I.F. Ituarte. *Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies*. CIRP Annals-Manuf. Technol., Vol. 65/1, pp. 29-32, 2016.
- [Ponche 2013] R. Ponche. *Méthodologie de conception pour la fabrication additive, application à la projection de poudres*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2013.
- [Soshi 2017] M. Soshi, J. Ring, C. Young, Y. Oda, M. Mori. *Innovative grid molding and cooling using an additive and subtractive hybrid CNC machine tool*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2017.
- [Syed 2005] W.U.H Syed, A.J. Pinkerton, L. Li. *A comparative study of wire feeding and powder feeding in direct diode laser deposition for rapid prototyping*. Applied surface science, Vol. 247/1, pp. 268-276, 2005.



# Métal d'apport sous forme de poudre : limites

- Obtention des poudres :
  - Onéreux
  - Impactant sur l'environnement :
    - Exemple : obtention d'1 kg de poudre de titane par atomisation [Paris 2016] :
      - 5,5 m<sup>3</sup> d'Argon
      - 6,6 kWh d'électricité
      - 155 L d'eau
      - 1,03 kg de titane