



HAL
open science

Fabrication additive par dépôt direct multi-axes

Sébastien Campocasso, Matthieu Museau

► **To cite this version:**

Sébastien Campocasso, Matthieu Museau. Fabrication additive par dépôt direct multi-axes. École thématique. 3ème Ecole technologique du Réseau Des Mécaniciens du CNRS : "Procédés de fabrication additive: règles et méthodes", Carqueiranne, France. 2017. cel-01862901

HAL Id: cel-01862901

<https://hal.science/cel-01862901v1>

Submitted on 27 Aug 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Fabrication additive par dépôt direct multi-axes

Sébastien CAMPOCASSO^a, Matthieu MUSEAU^b

^a Université de Toulon, Laboratoire COSMER

^b 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

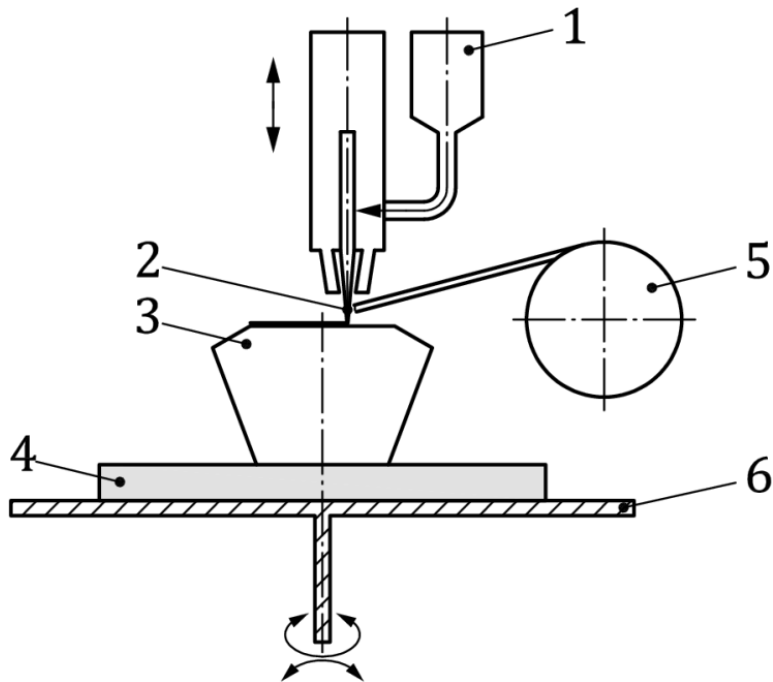
5) Applications

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]

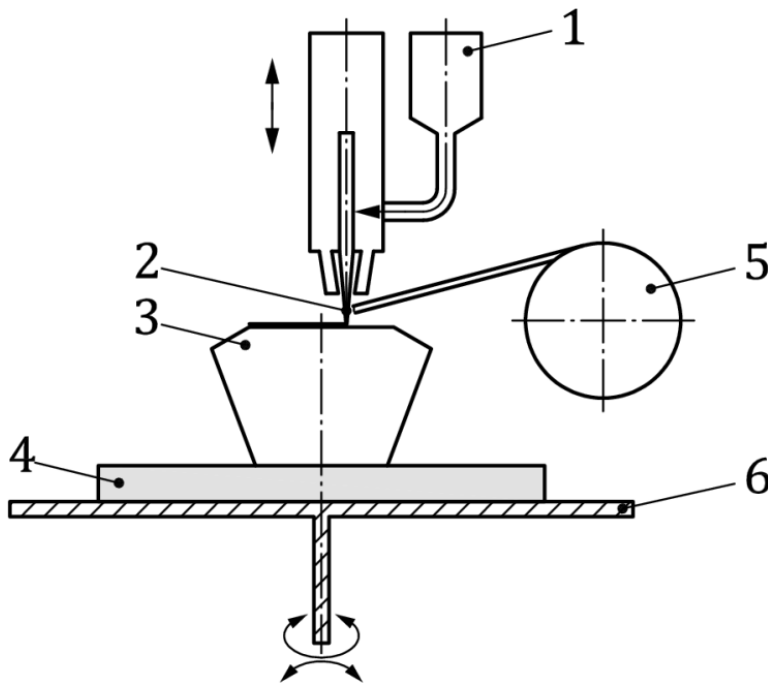
Éléments technologiques

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

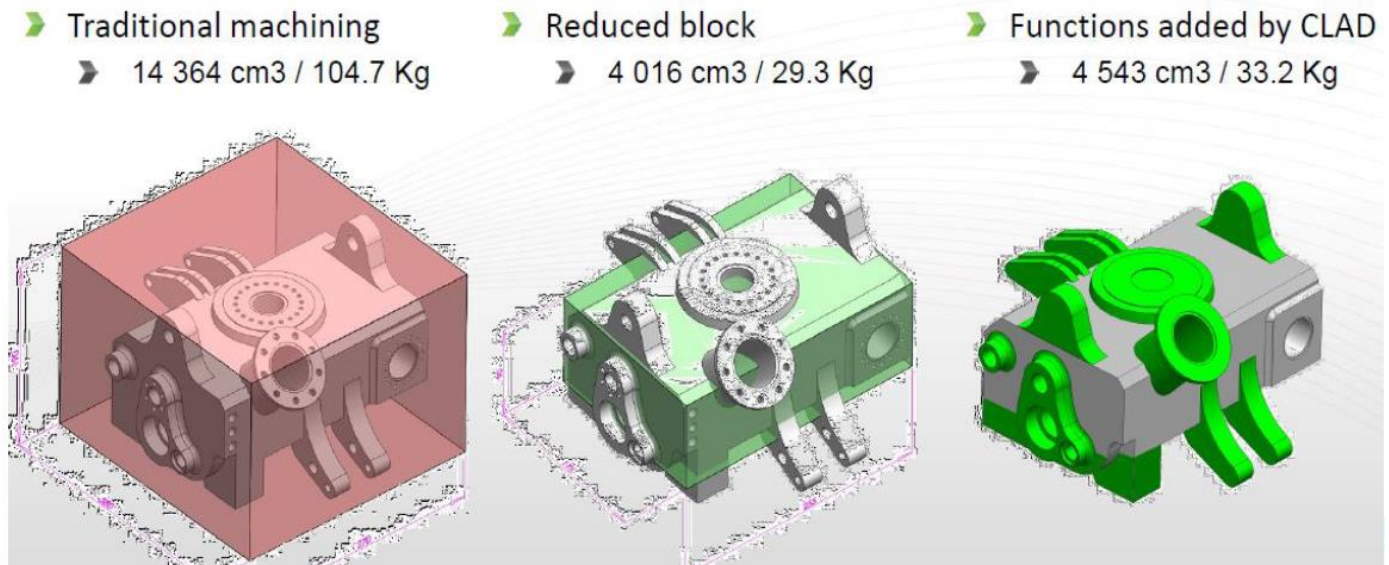
Intérêts du dépôt direct multi-axes

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

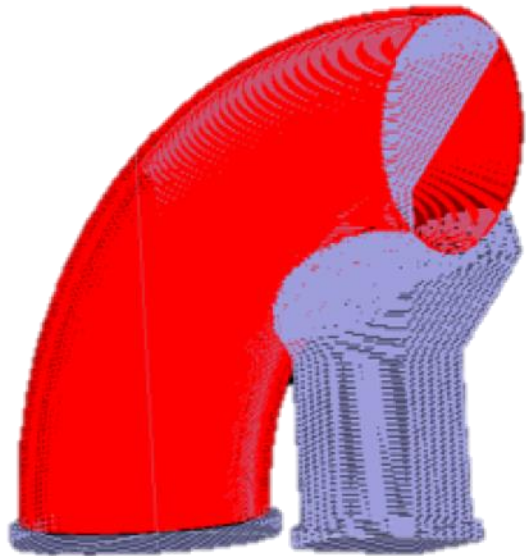


[DMG]

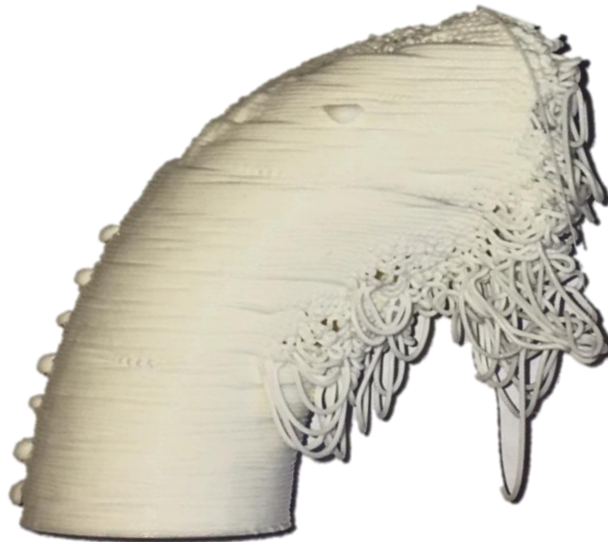


Principe de l'ajout d'entités [Frechard 2015]

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)

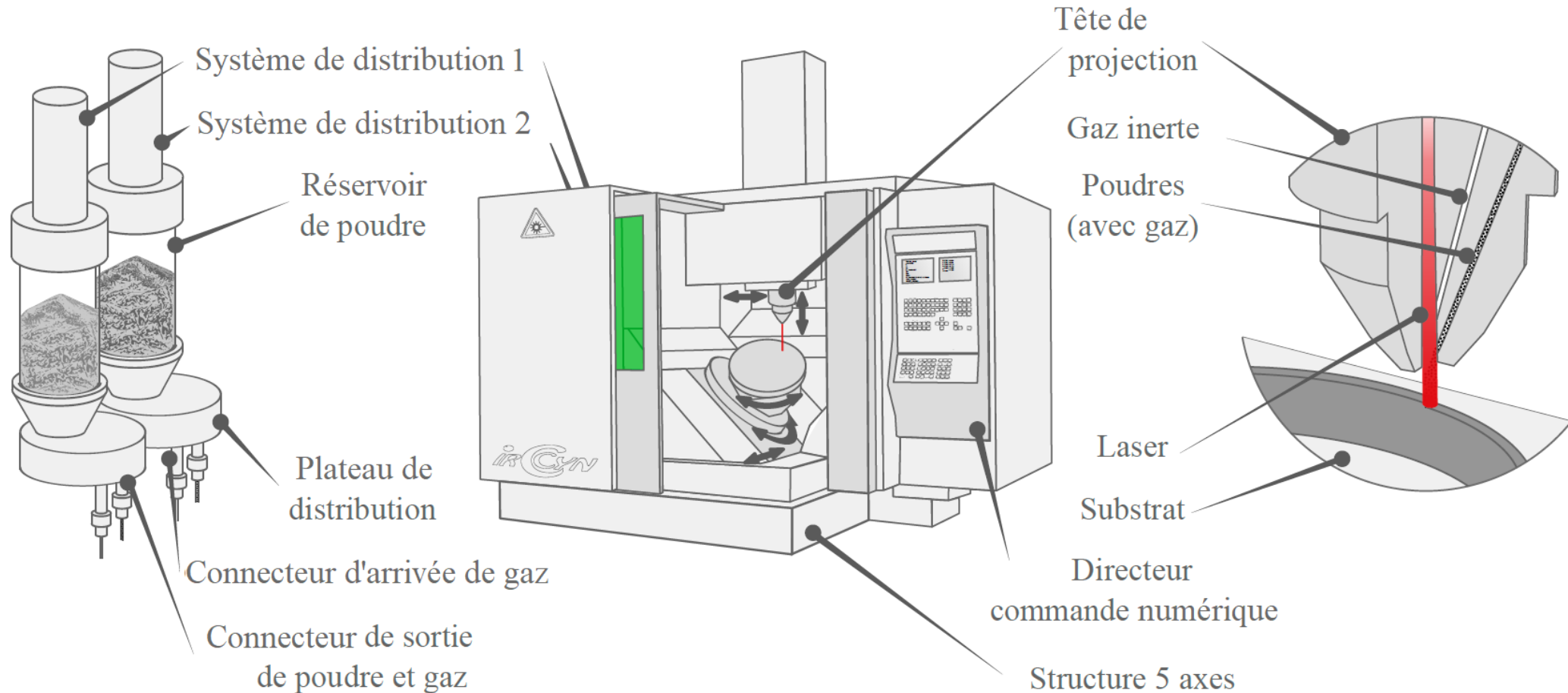
2) Projection de poudre (LMD-p / CLAD)

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

4) Dépôt de fil robotisé

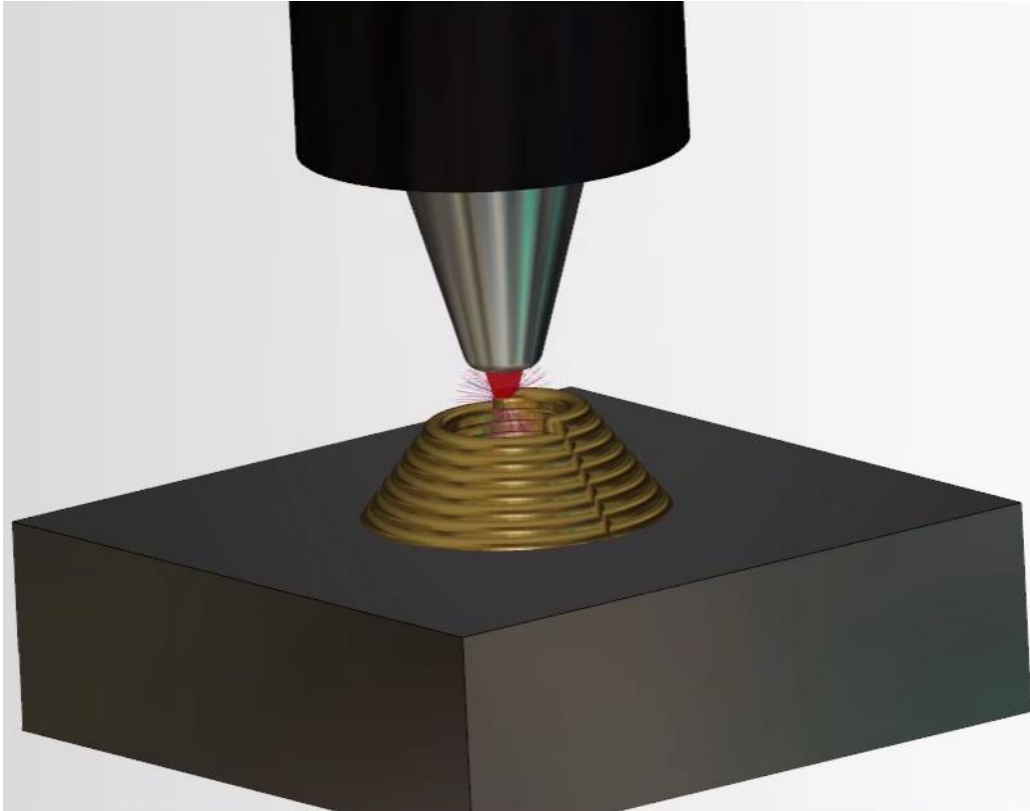
5) Applications

Projection de poudre (Laser Metal Deposition-powder)

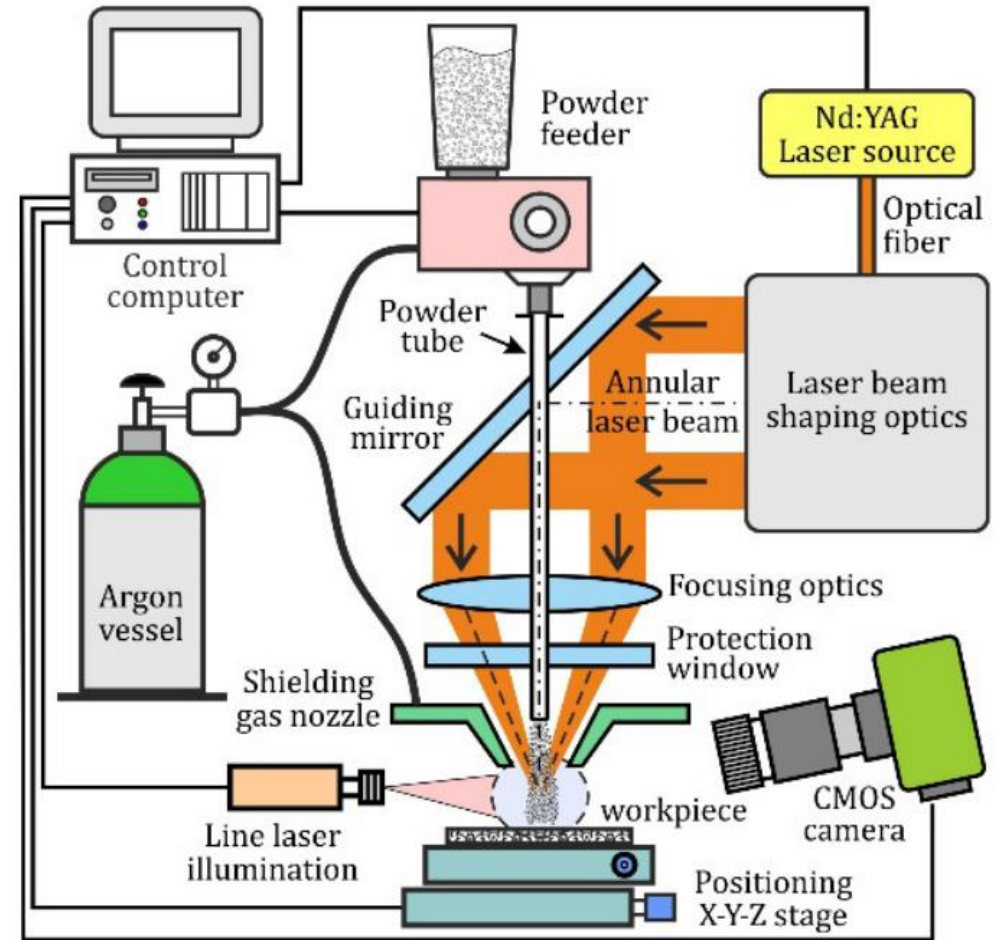


Principe d'une machine 5 axes de projection de poudre [Muller 2013]

Projection de poudre

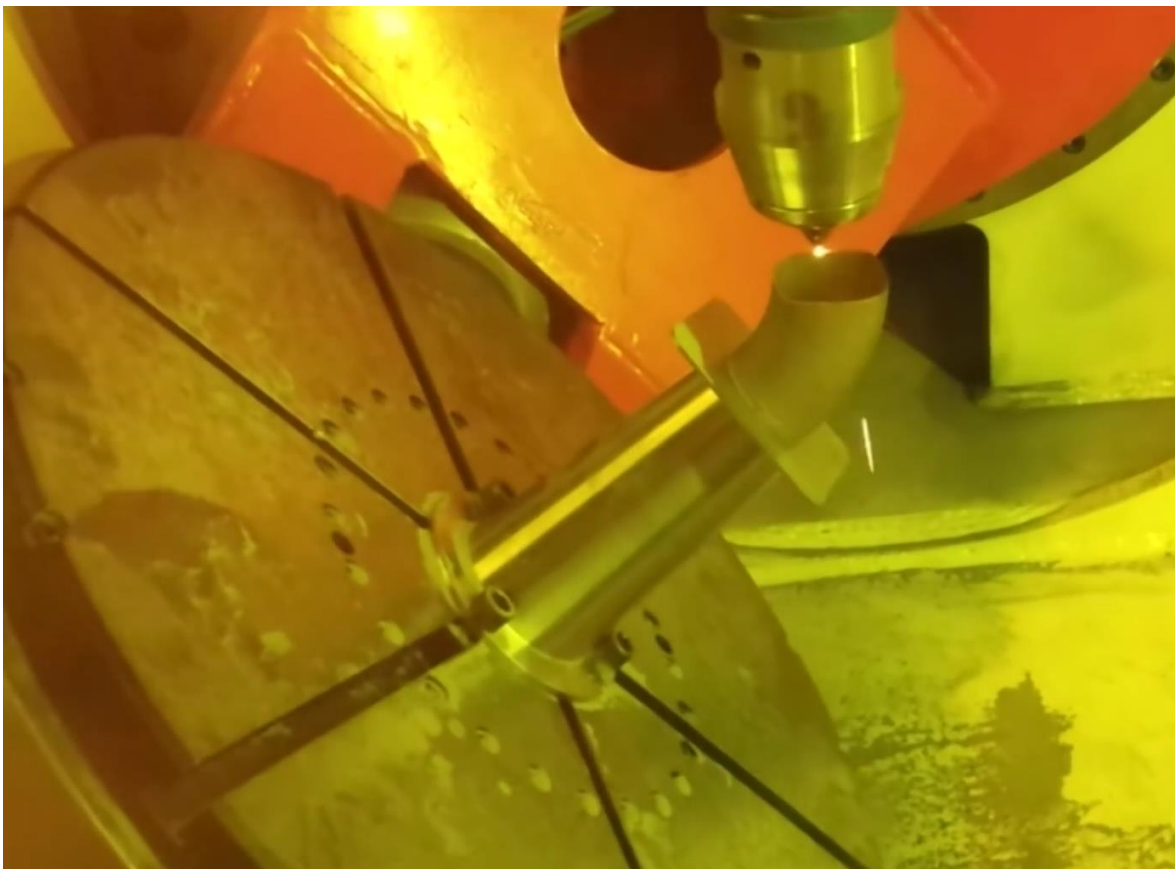


Simulation (FAO) d'un dépôt [MODULE WORKS]



Buse avec faisceau laser "annulaire" [Kuznetsov 2016]

Projection de poudre



Exemple de fabrication par projection de poudre [BeAM]

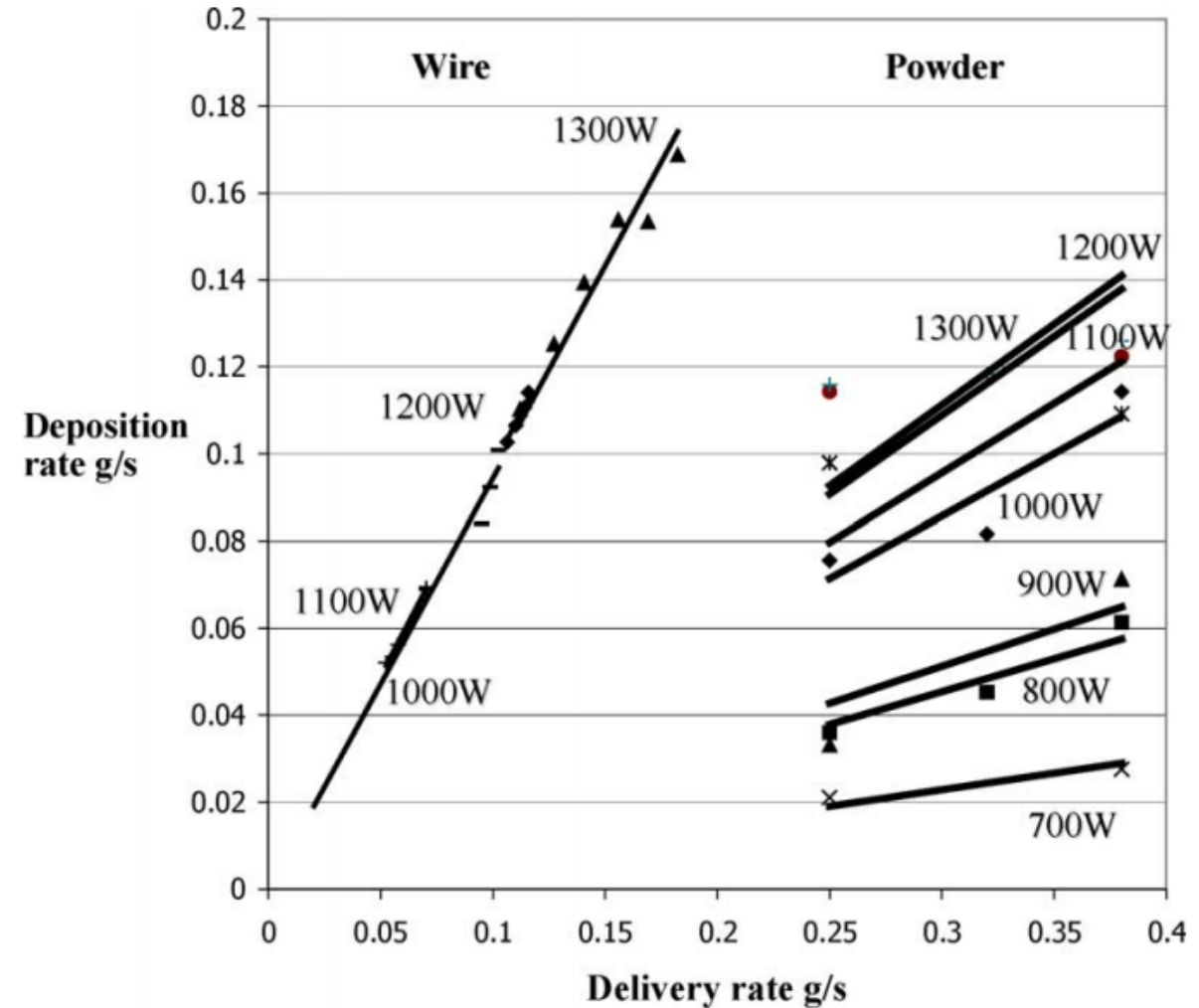


Difficultés

- 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 ?

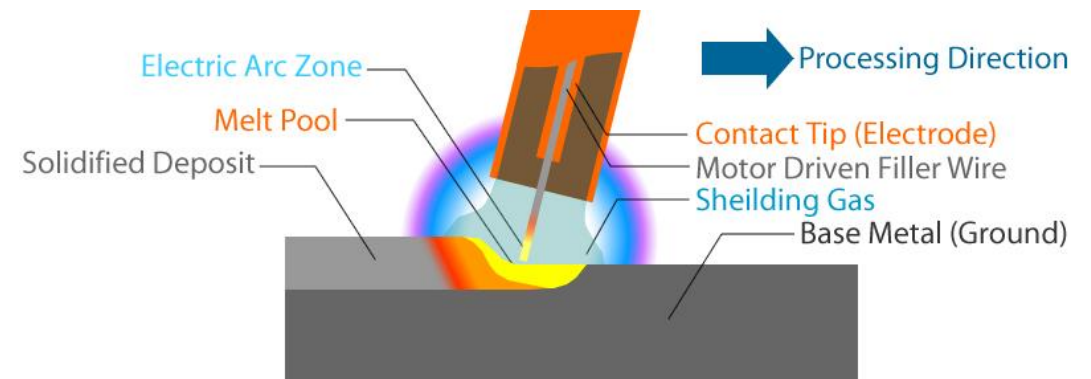
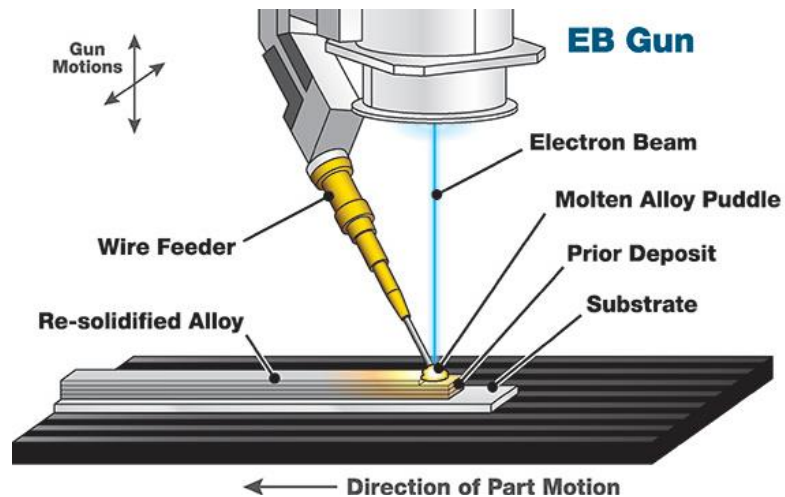


Taux de dépôt vs. Taux d'alimentation [Syed 2005]

- 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

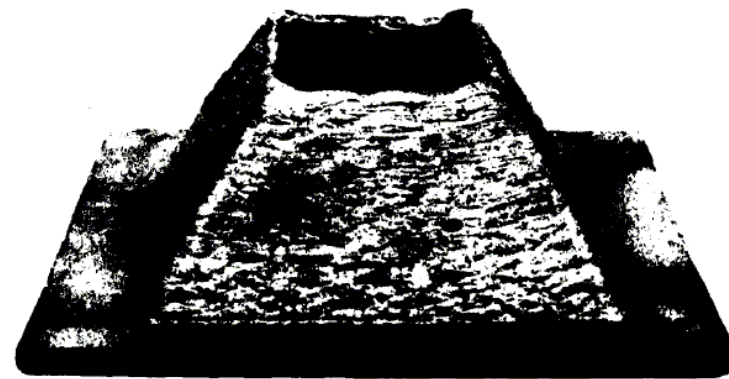
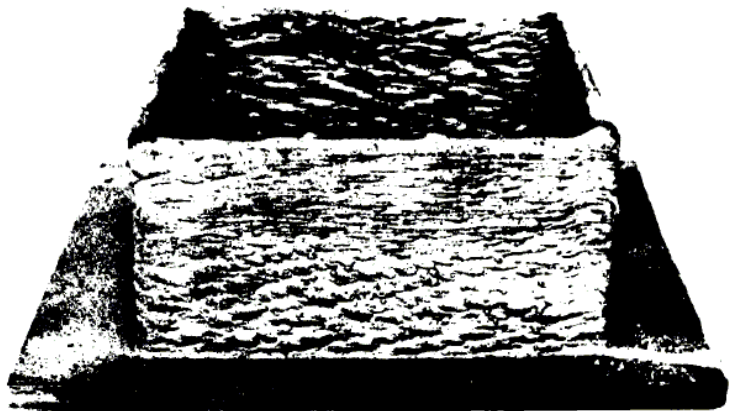
Procédés WAAM

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

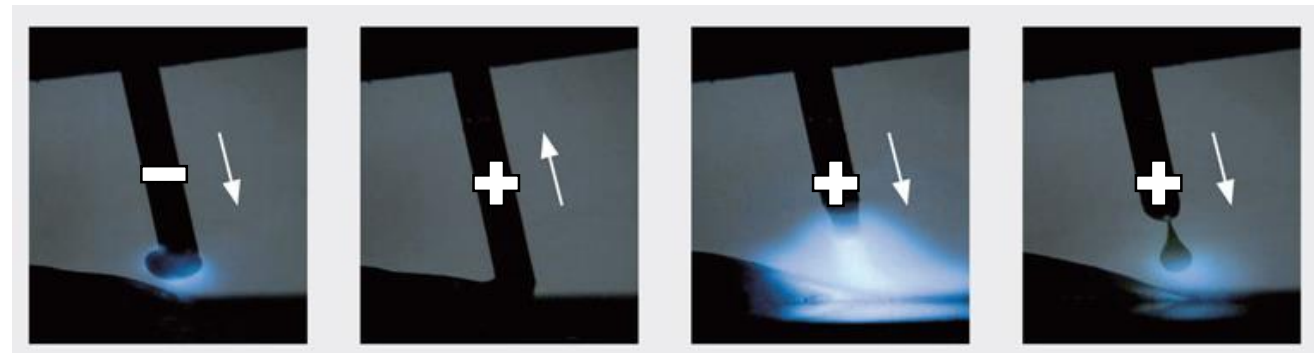
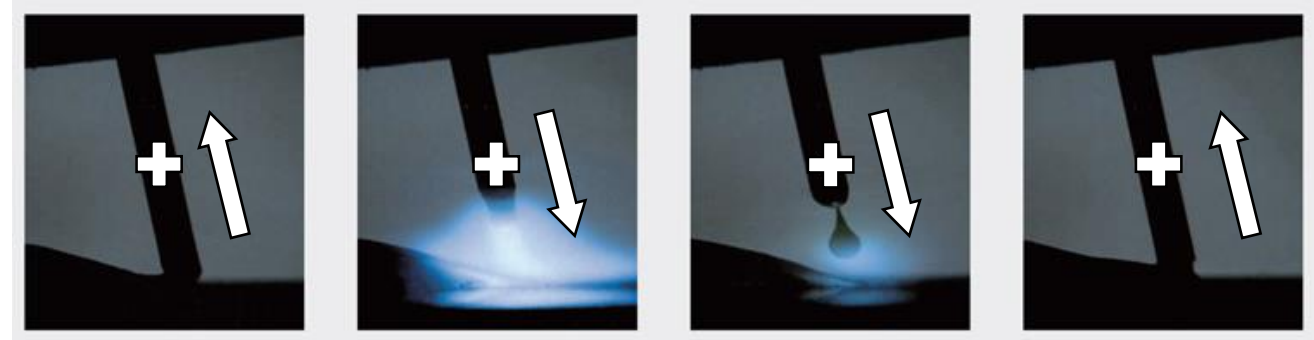
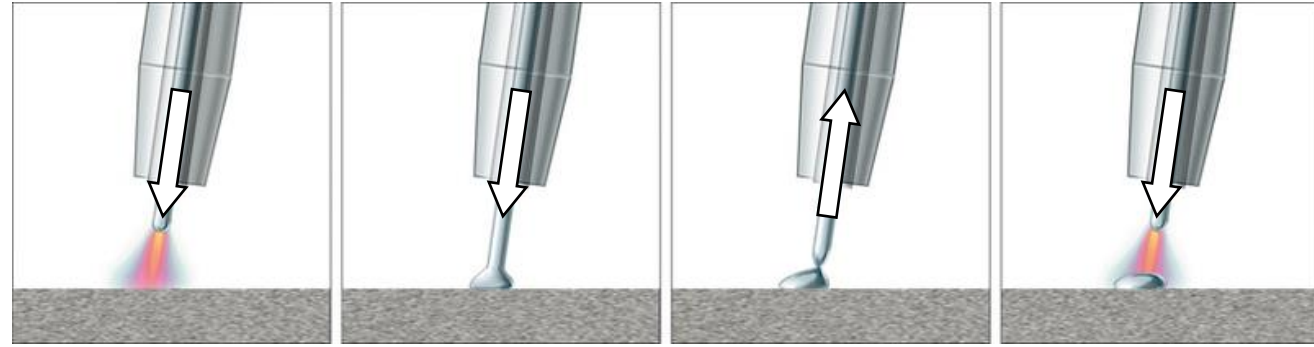


Essais de prototypage basés sur un procédé de soudure à l'arc [Dickens 1992]

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...)

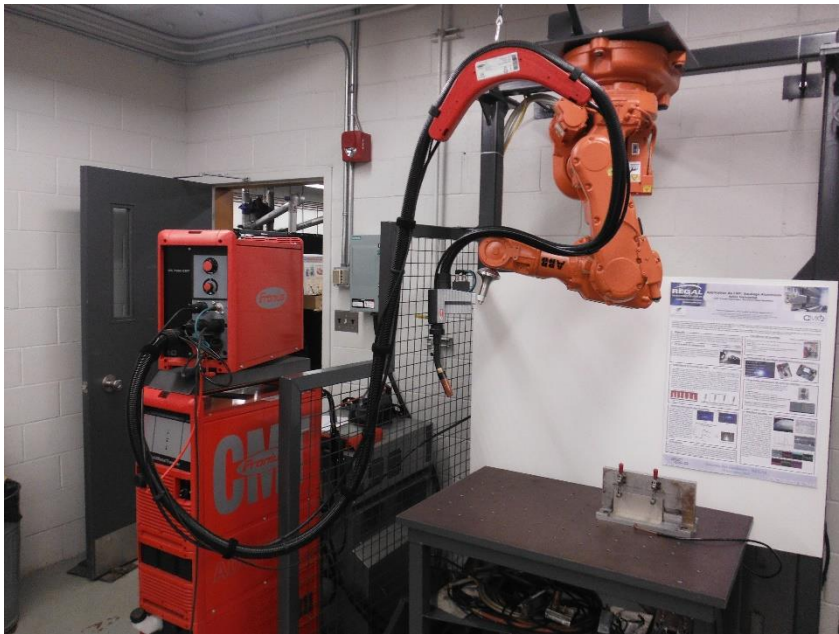
- Taux de dépôt > 99 %
- Vitesse de dépôt élevée

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

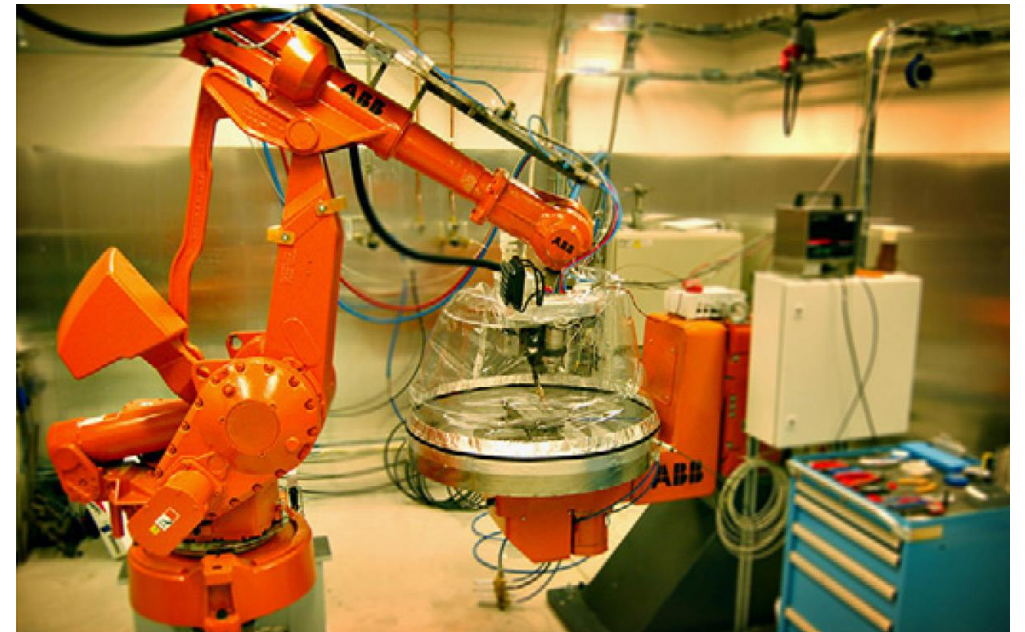
Mise en œuvre du dépôt

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

→ Porteur avec au moins 5 axes



Cellule robotisée CMT [CEGEP/CMQ]



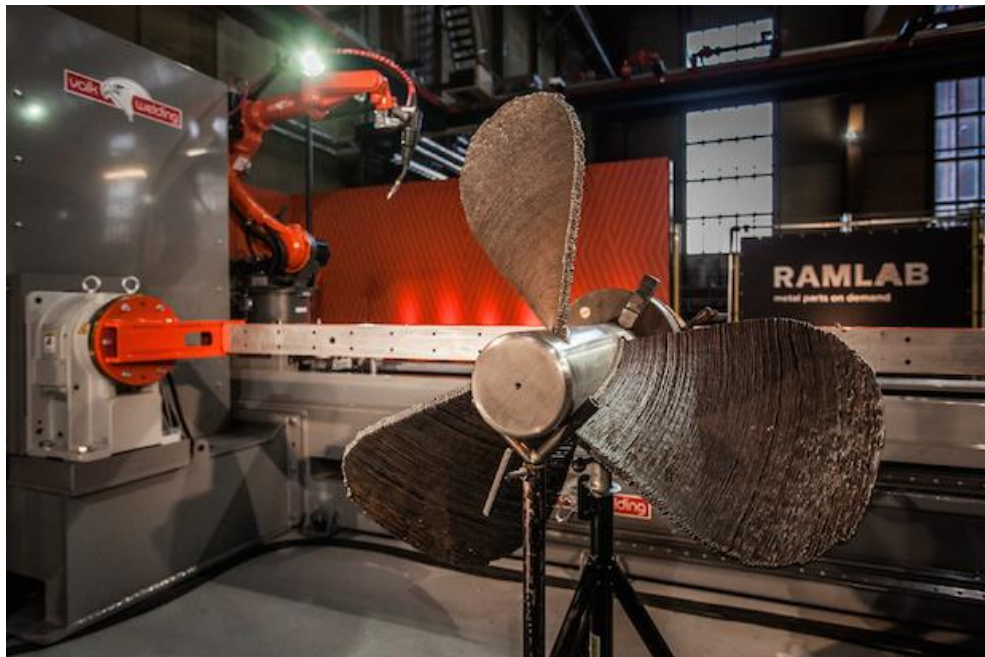
Cellule robotisée avec laser et atmosphère inerte [Heralic 2012]

- 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

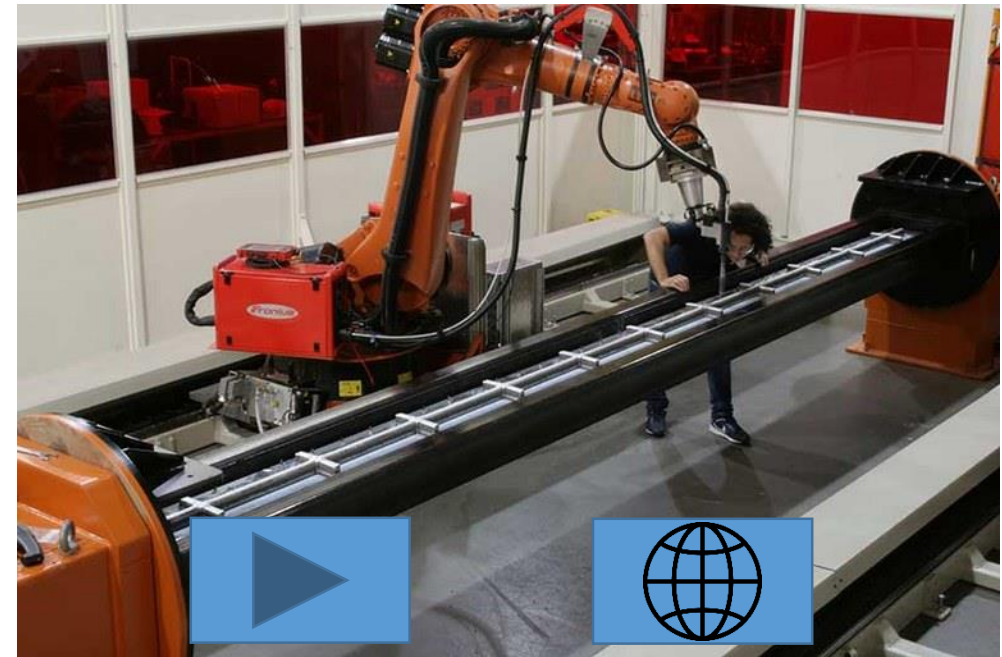
Dépôt de fil robotisé

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 m³ \approx 300 € (consommation \approx 20 L/min)
- **Maintenance :** 2500 €/an (hors pièces)

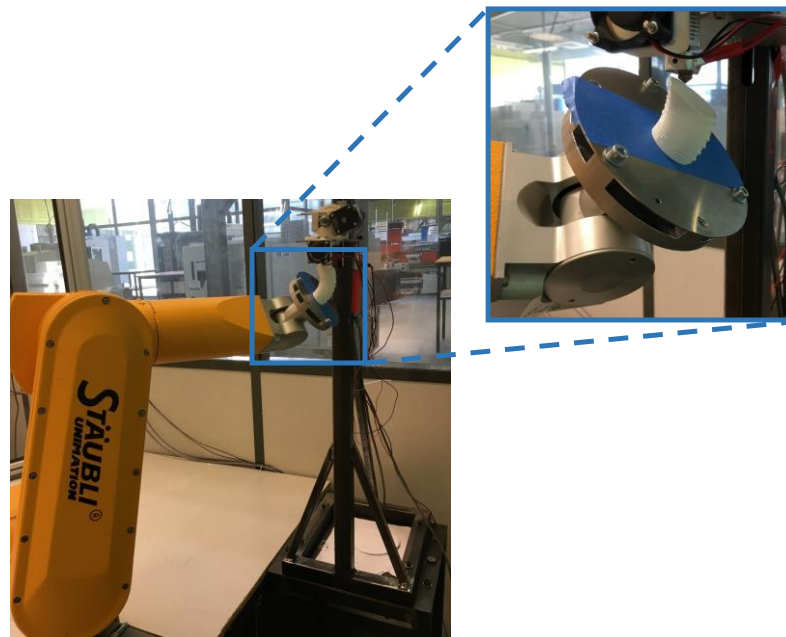
Configurations possibles

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



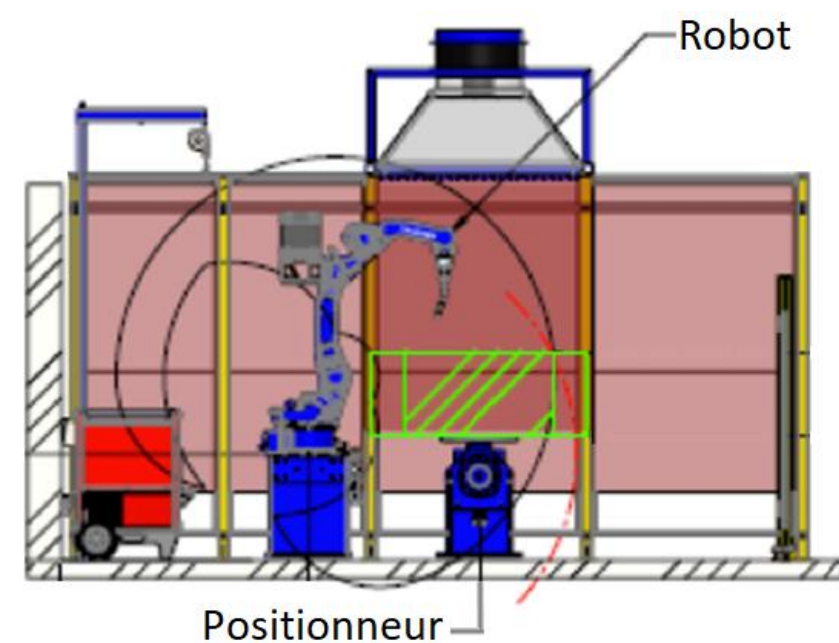
Torche mobile [DELCAM]

12/09/2017, Carqueiranne



Pièce mobile [Chalvin 2017]

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

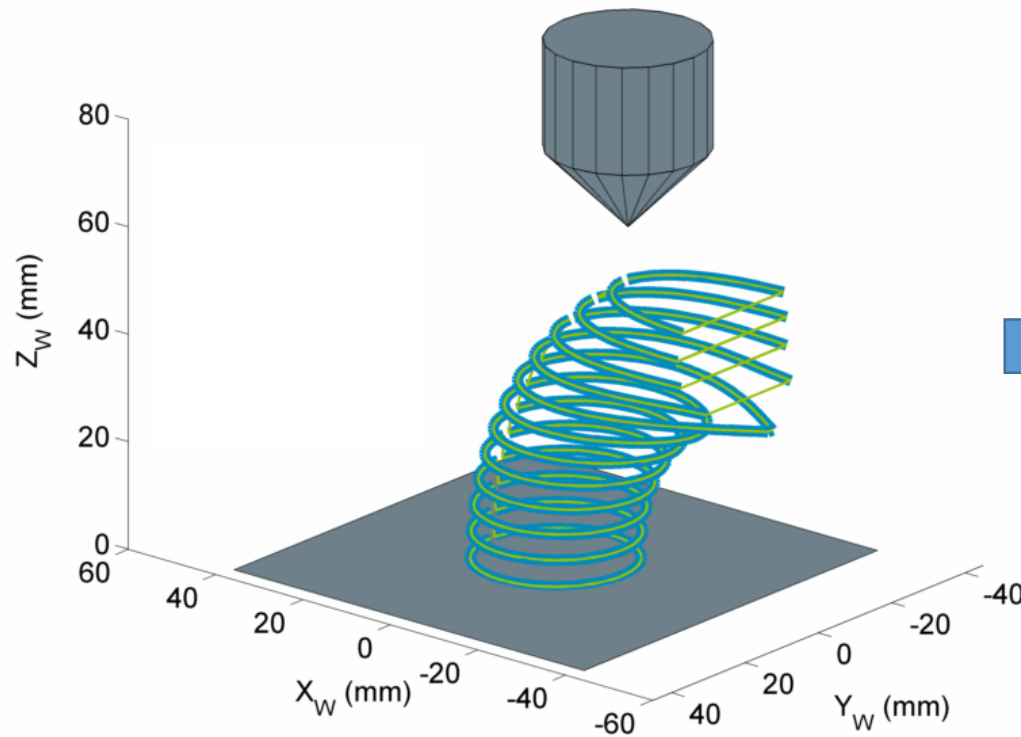


Robot 6 axes + Vireur 2 axes [YASKAWA]

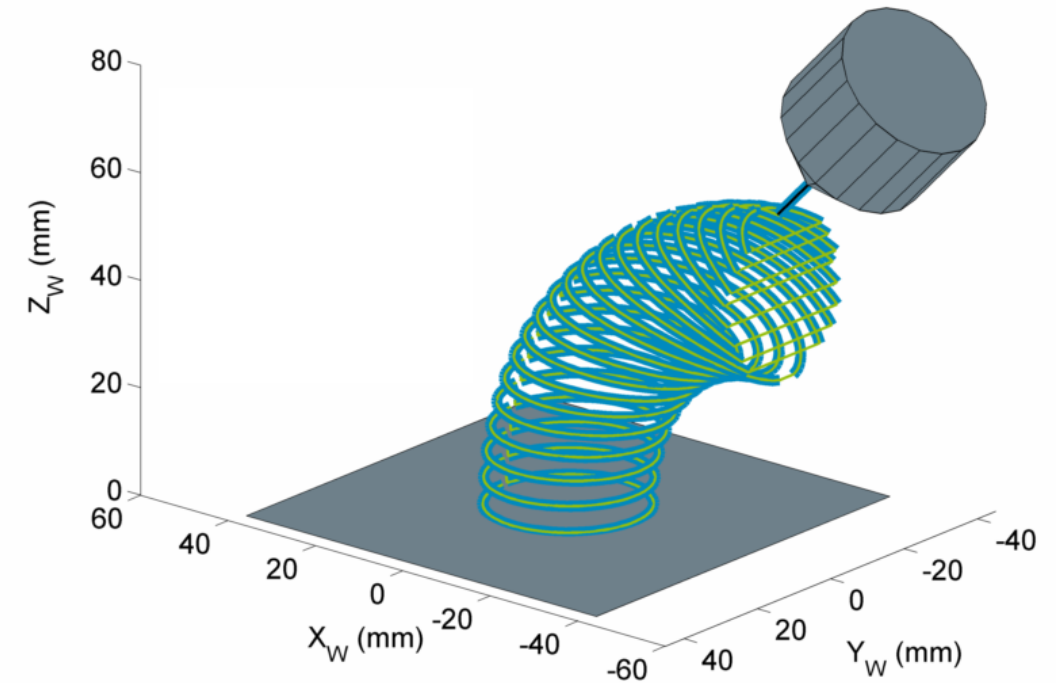
22 / 36

Evolution des trajectoires : 2,5D → 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

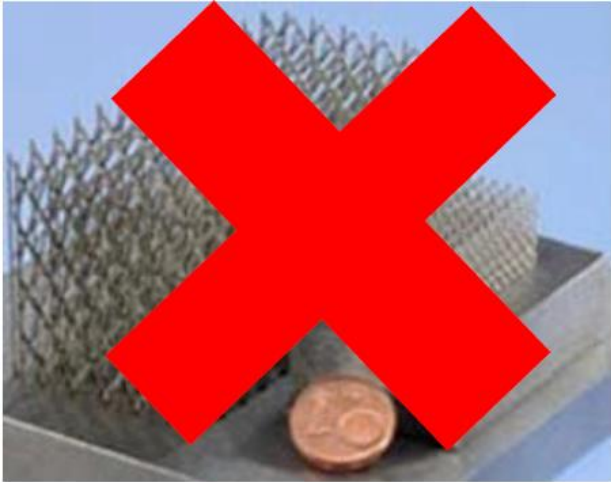


Exemple de deux pièces en acier fabriquées symétriquement sur le plateau [Addison 2015]

- 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 ?

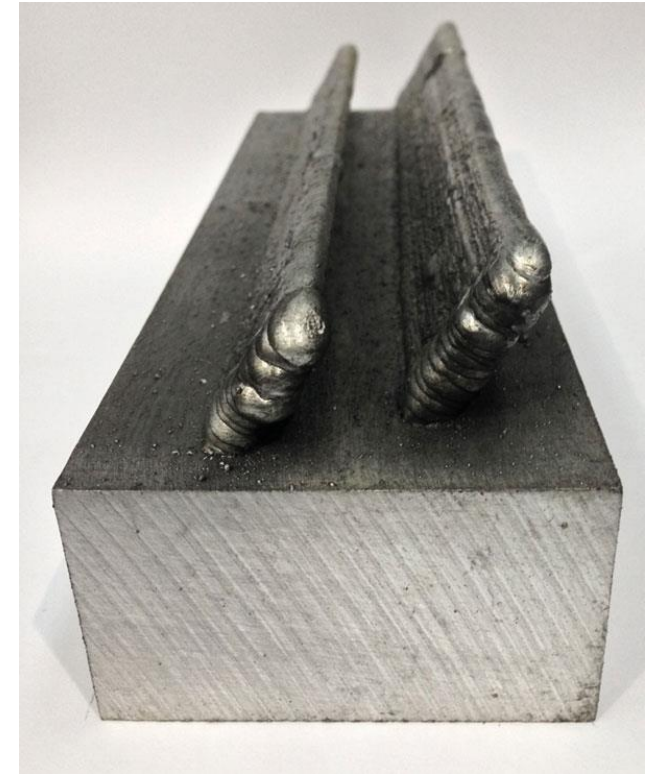


[Addison 2015]

Fabrication de pièces brutes de grandes dimensions :

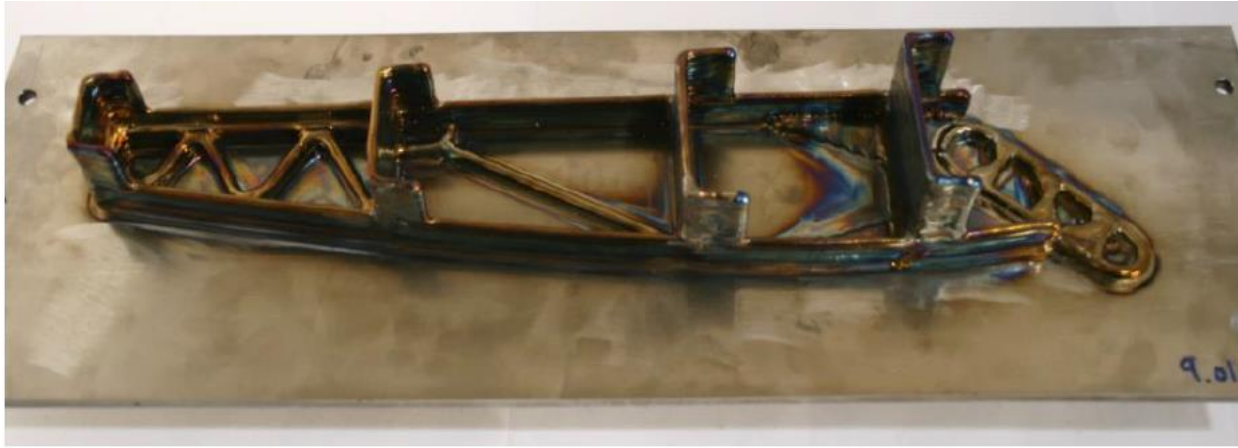
- Gain de matière
- Diminution du coût
- Réduction du temps de fabrication
- Formes moyennement complexes
- Faible qualité dimensionnelle

WAAM – Pièces de démonstration



Pièces de démonstration [FRONIUS]

Ebauches de pièces complexes en matériaux "durs"



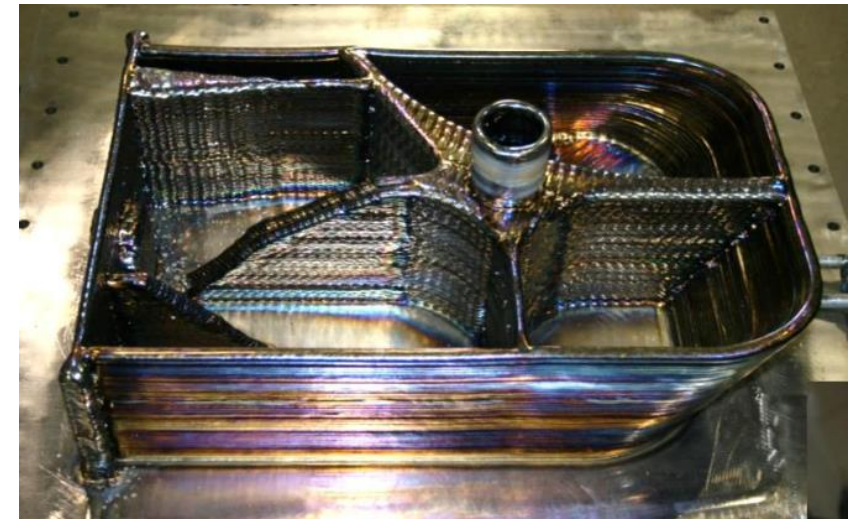
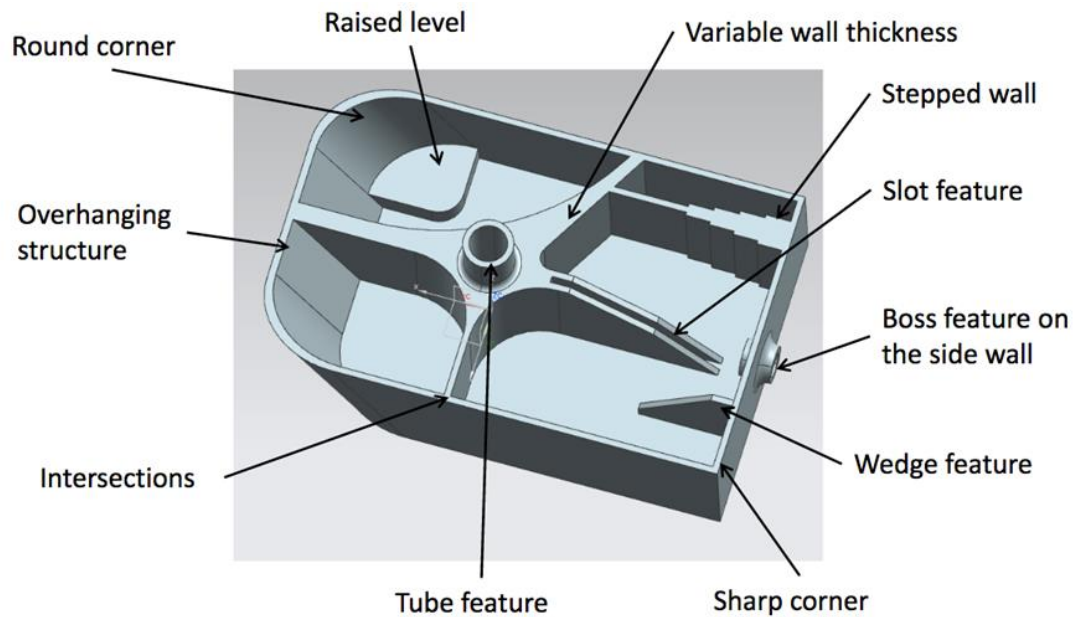
- Temps de fabrication : 2 jours
- Epaisseur mini : 4.4 mm

- 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



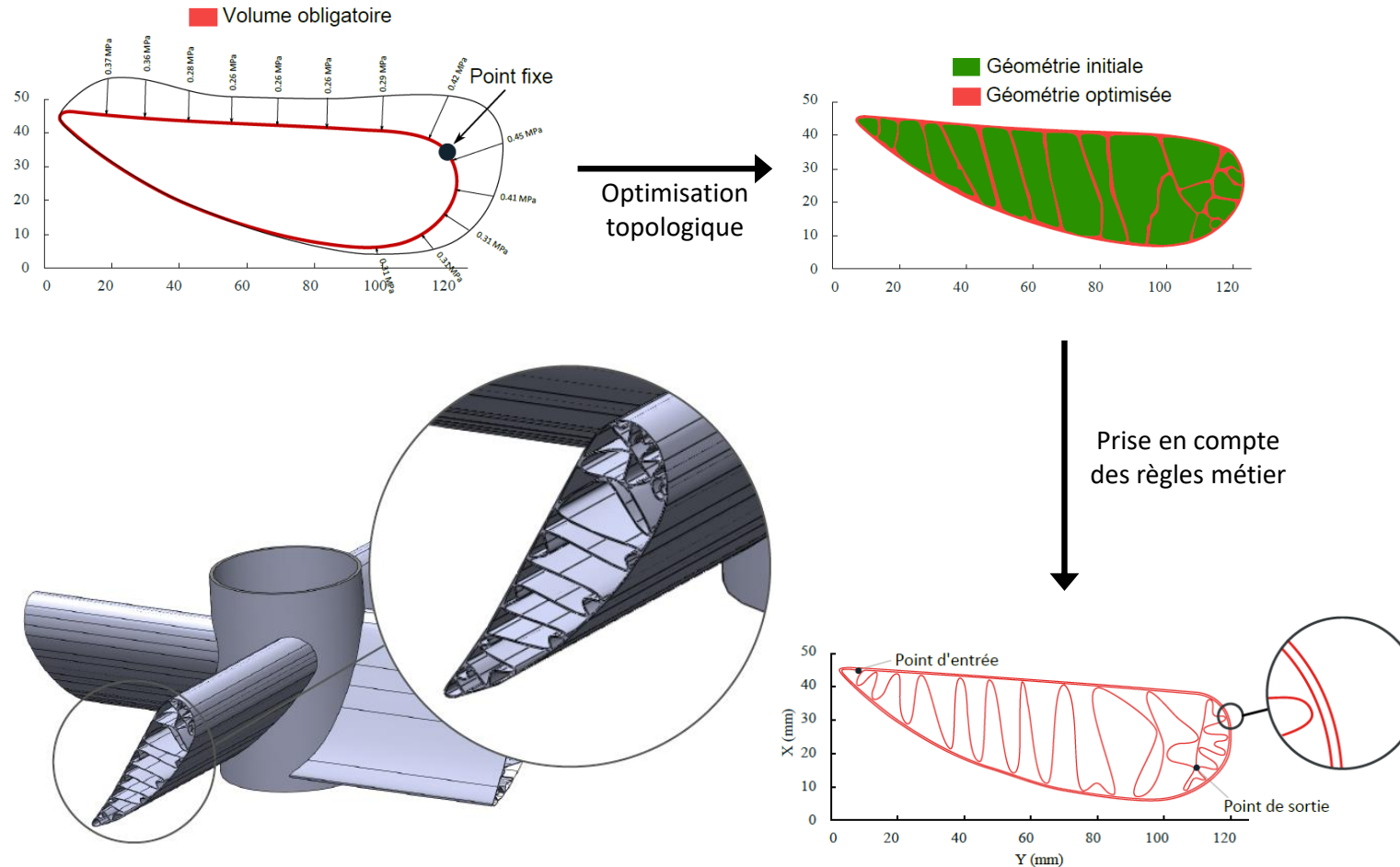
Ajout de matière sur un disque central forgé [Appelyard 2012]

Projection de poudre – Exemples



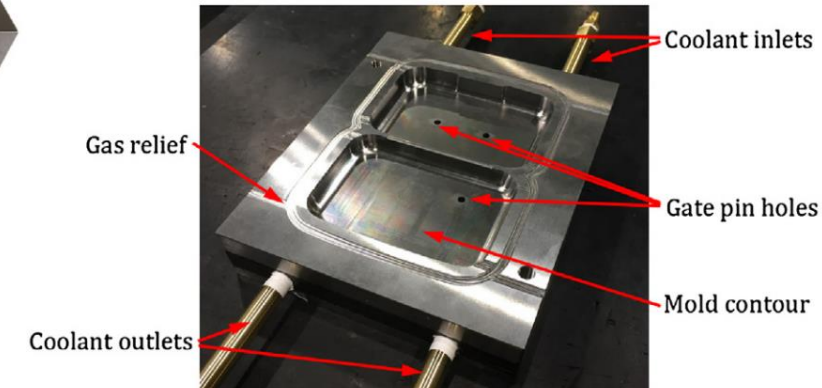
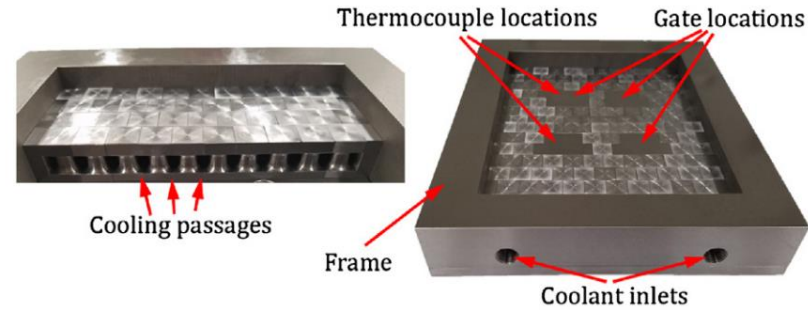
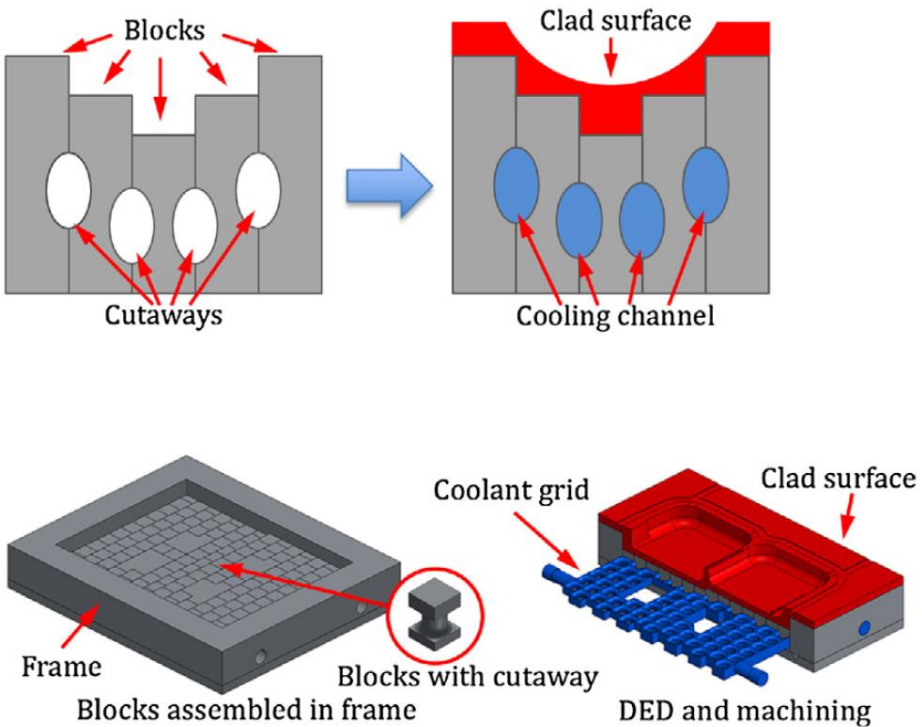
Conduits aéronautiques obtenus par projection de poudres [Le Bourhis 2014]

Projection de poudre – Optimisation



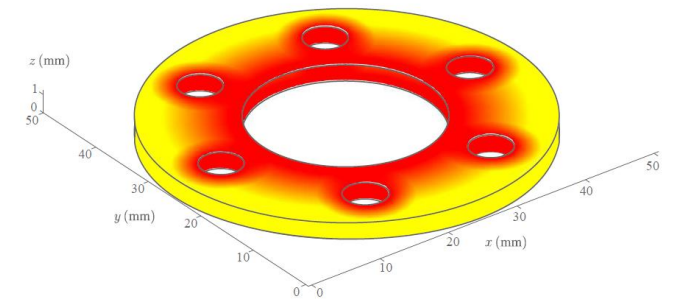
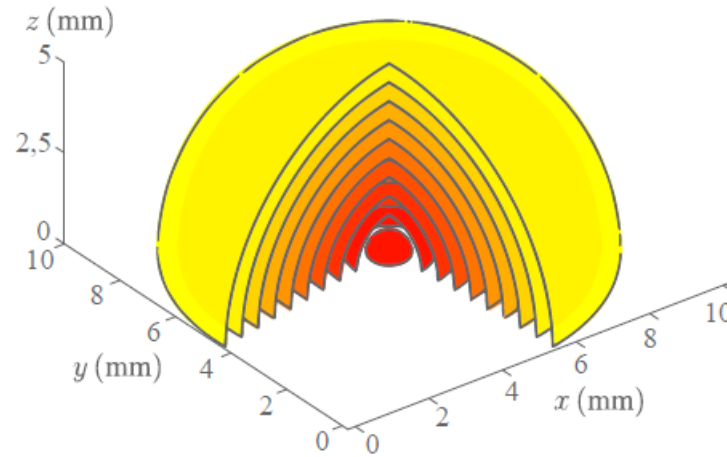
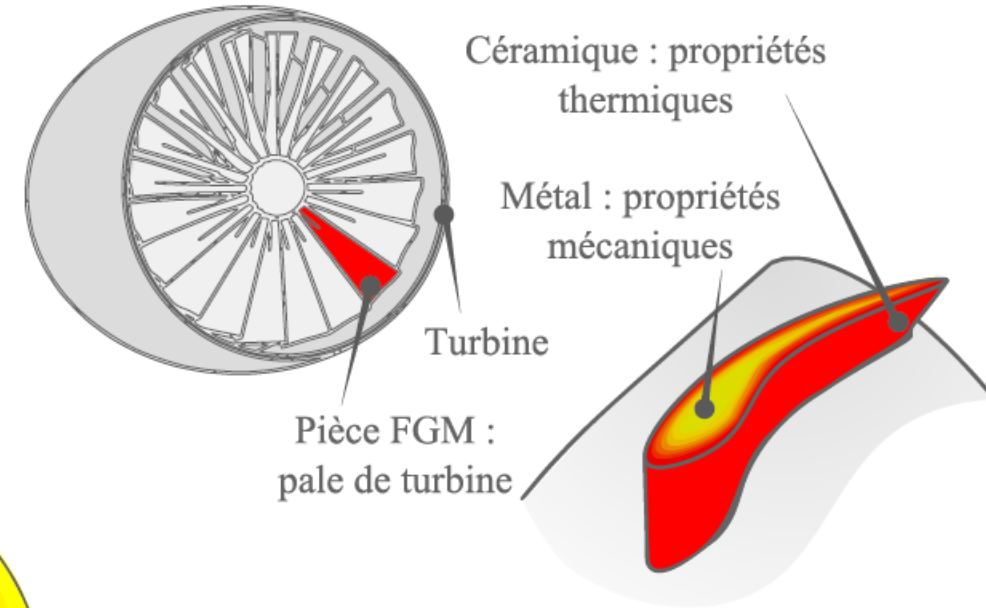
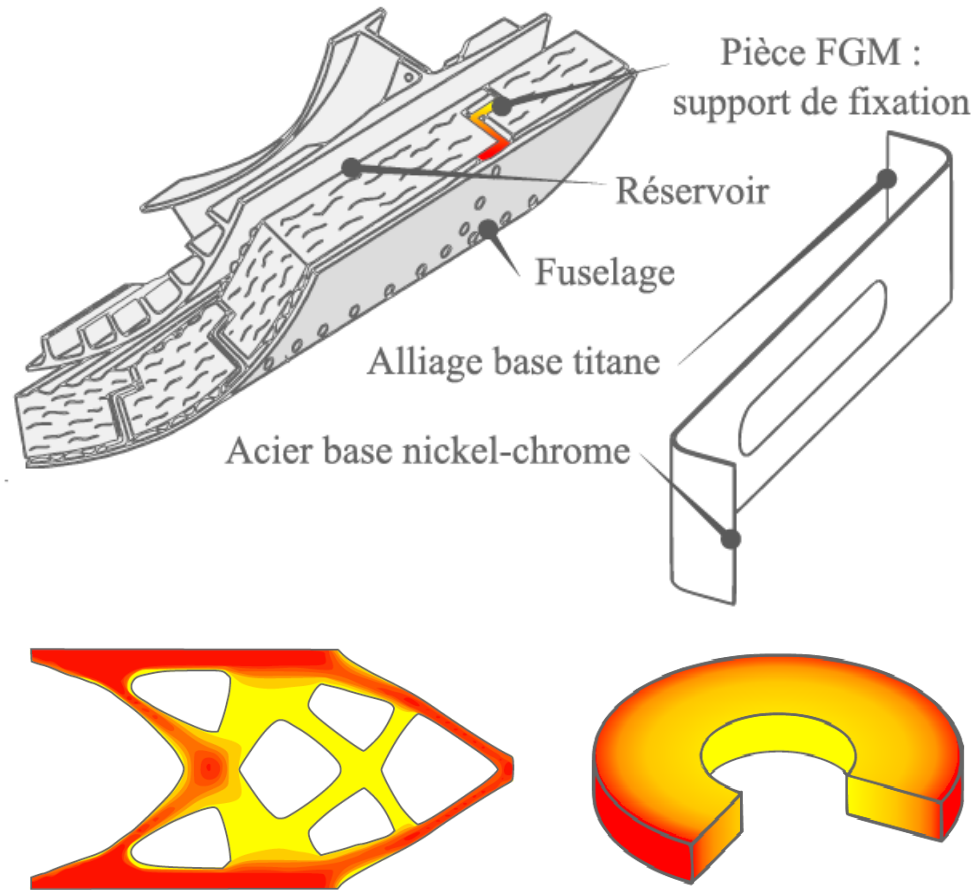
Exemple de pièce optimisée obtenable par projection de poudres [Ponche 2013]

Fabrication hybride de moules



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

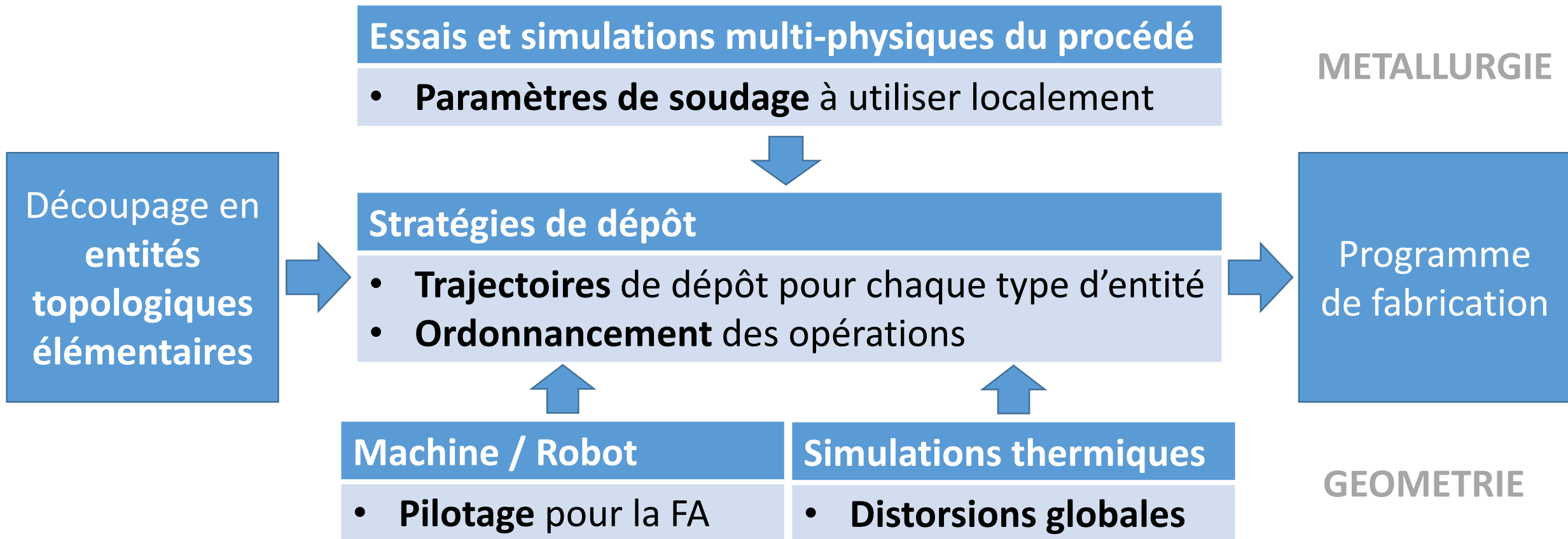
Pièces multi-matériaux



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

Matthieu MUSEAU

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 m³ d'Argon
 - 6,6 kWh d'électricité
 - 155 L d'eau
 - 1,03 kg de titane