

INTRODUCTION A LA FABRICATION ADDITIVE

Myriam ORQUÉRA



PLAN

- Pourquoi ce cours?
- Panorama des procédés de fabrication
- Comment concevoir pour ces nouvelles technologies?
- Optimisation de conception

Objectifs du cours

Permettre à l'étudiant ingénieur :

- De connaître les derniers procédés de fabrication
- De pouvoir les comparer à d'autres procédés
- D'en connaître les avantages et inconvénients
- D'être capable de concevoir pour la FA
- D'être capable d'optimiser la conception et la fabrication pour la FA

PROCÉDÉS DE FABRICATION

- Citez les différentes procédés de fabrications

Par enlèvement de matière



Par déformation



Par fusion



Par ajout de matière



PROCÉDÉS DE FABRICATION

- **Par fabrication additive**

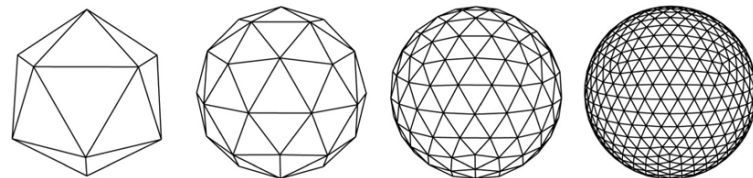
(Thompson et al. 2016)

“Le processus de fabrication additive produit des objets physiques à partir d’informations numériques, et ce, ligne par ligne, surface par surface, ou couche par couche”.



FABRICATION ADDITIVE

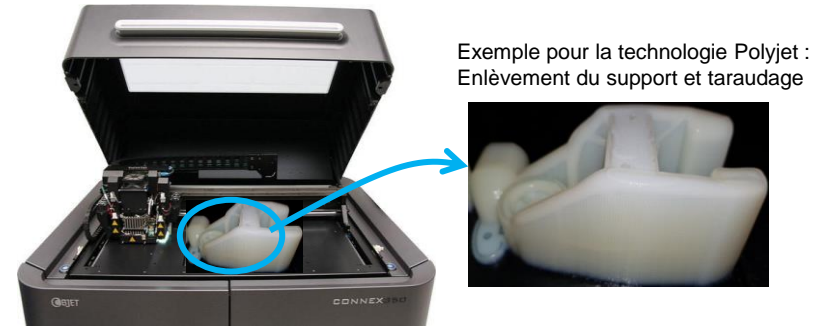
- Principe du processus de fabrication additive



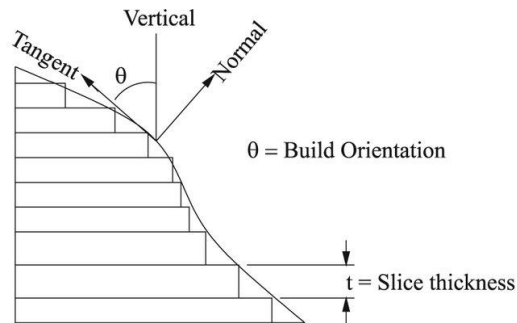
Influence de la finesse de la facettisation sur la géométrie

FABRICATION ADDITIVE

- **Principe**



3- Mise en couche et impression



Staircase effect (l'effet escalier) du procédé de dépôt de couche (Pandey, Reddy and Dhande, 2007)

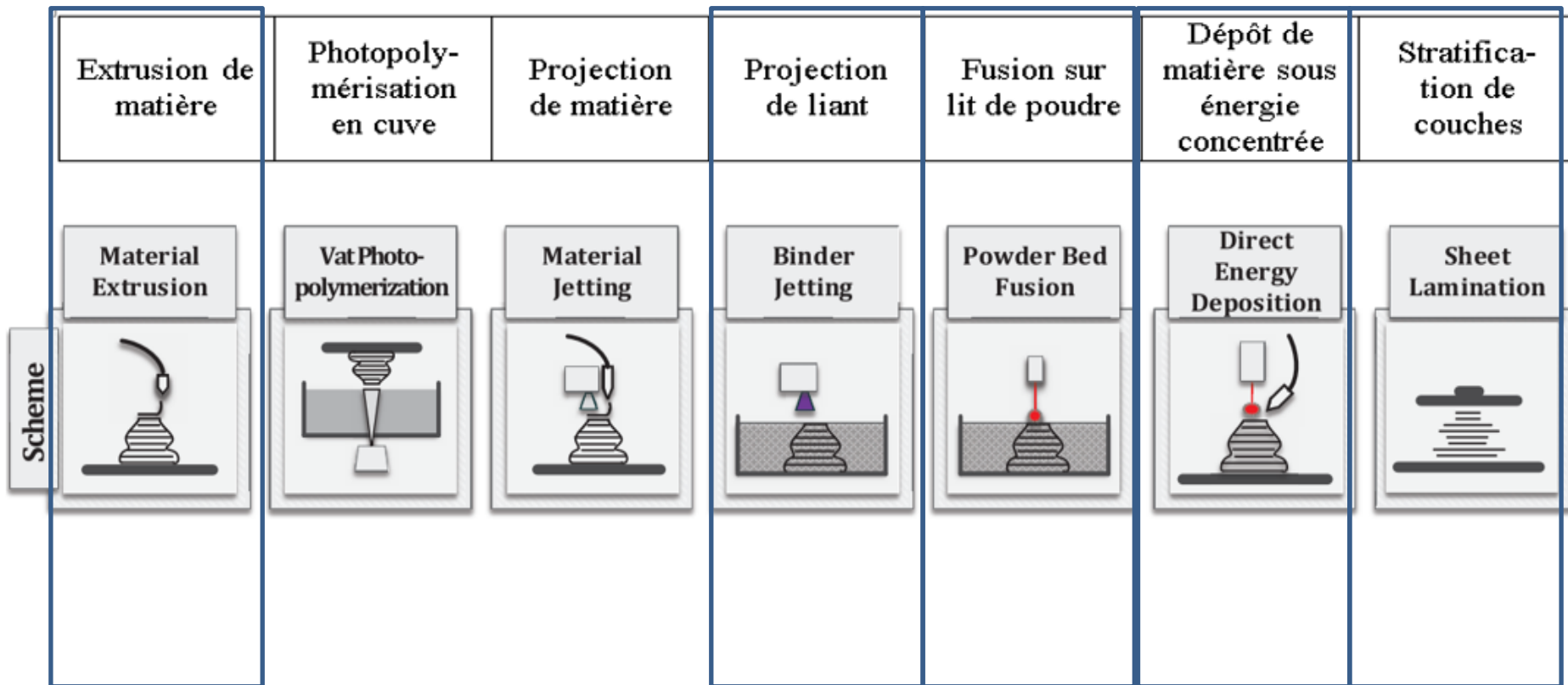


Exemple pour la technologie L-PBF: Enlèvement du support, usinage et traitement de surface

LES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS

- Il existe 7 procédés de FA référencés par la norme

FA Métallique



FUSION SUR LIT DE POUDRE

Powder Bed Fusion (PBF)

- 2 familles de PBF métallique
 - Fusion LASER sur lit de poudre
 - Fusion par FAISCEAUX d'ELECTRONS sur lit de poudre

Fusion LASER sur lit de poudre

Laser Powder Bed Fusion L-PBF

- Appellations
 - L-PBF (Laser Powder Bed Fusion)
 - SLM (Selective Laser Melting)
 - LBM (Laser Beam Melting)



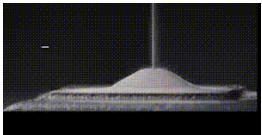
- Principe

Remplir l'enceinte de gaz inerte

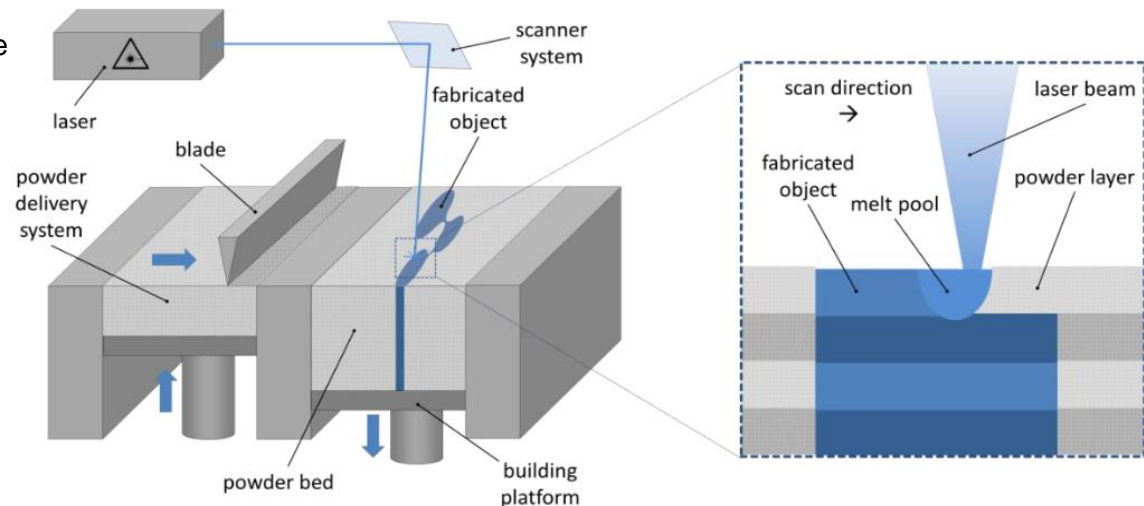
Jusqu'à la dernière couche

→ Pièce brute finit

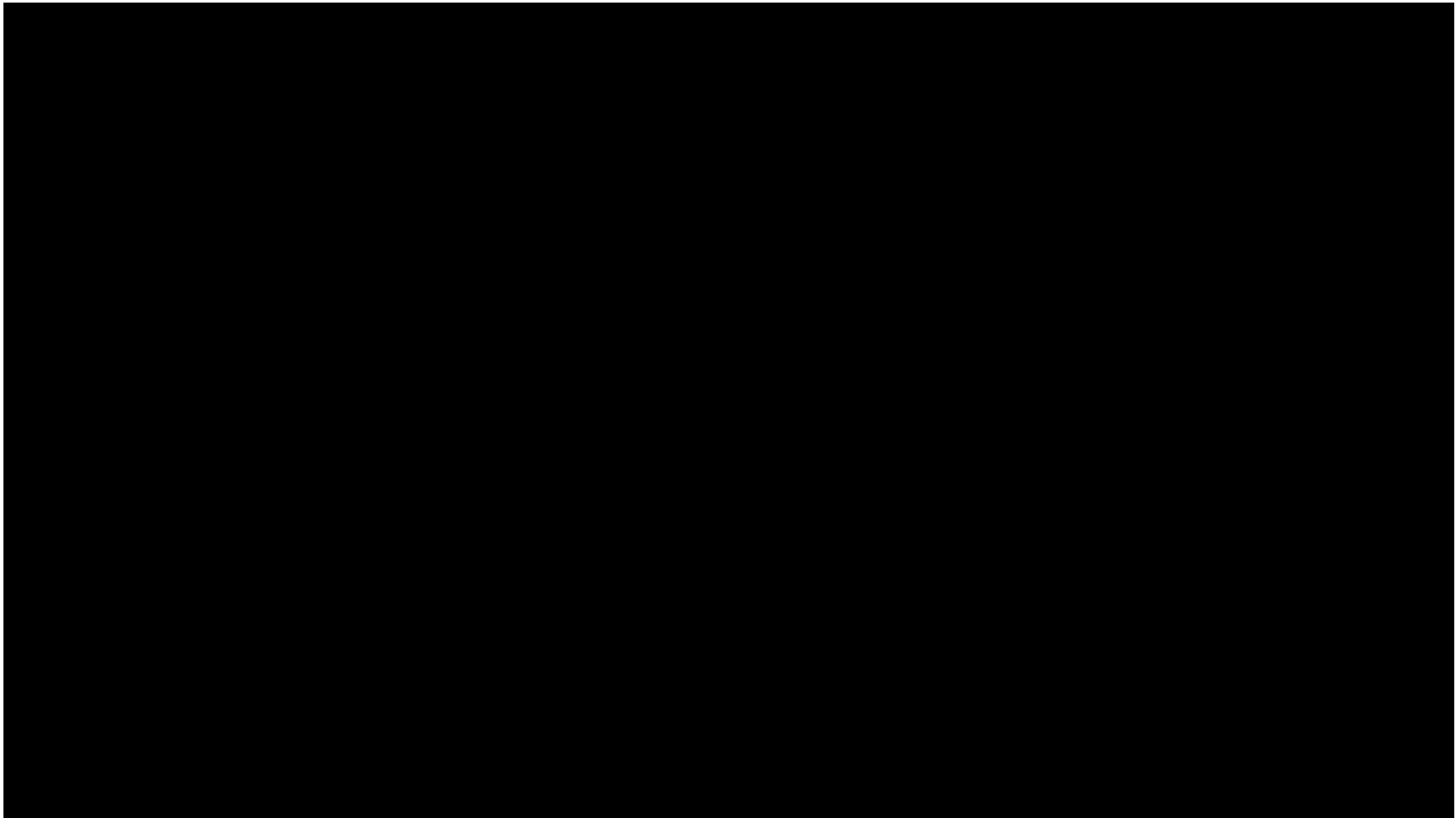
Billes de métal de $\phi 20 \mu\text{m}$ en moyenne



Epaisseur courante de couche : $30 \mu\text{m}$



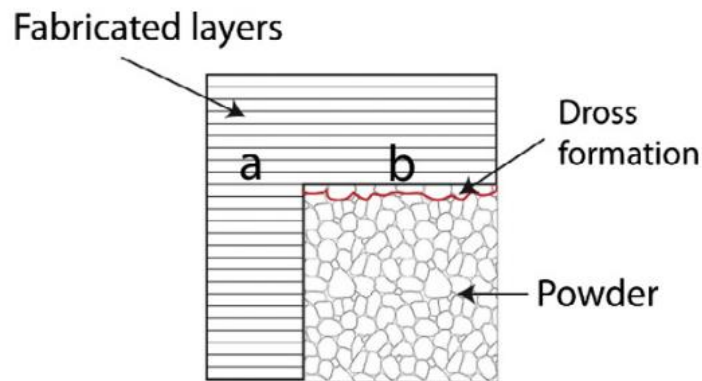
Fusion LASER sur lit de poudre Laser Powder Bed Fusion L-PBF



Fusion LASER sur lit de poudre

Laser Powder Bed Fusion L-PBF

- Problématiques de la technologie
 - Les scories (Dross):
 - rebuts de poudre fusionnée
 - Le bain de fusion se propage dans la couche inférieure par gravité et forces capillaires
- => défaut géométrique et augmentation de la rugosité



Scories sur surface en porte à faux
pour LBM (Calignano, 2014)

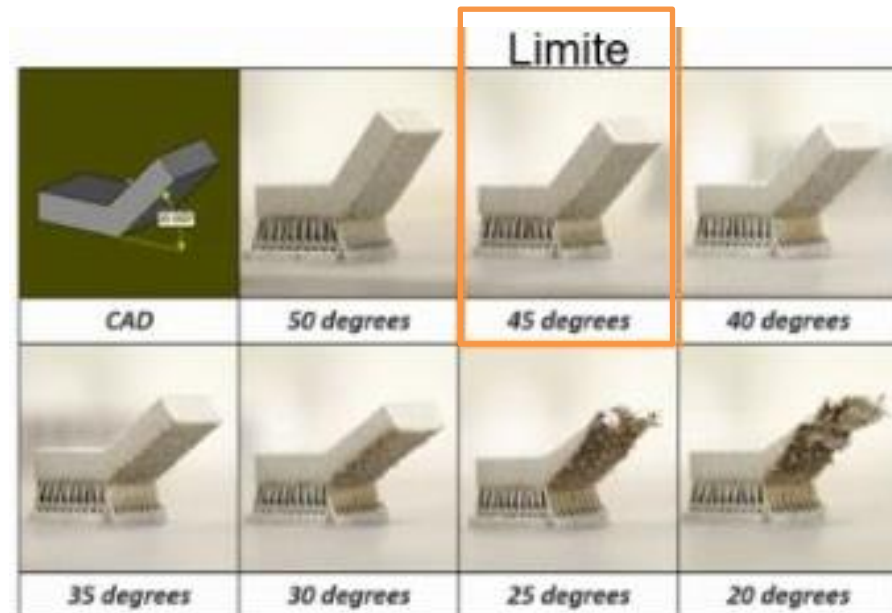
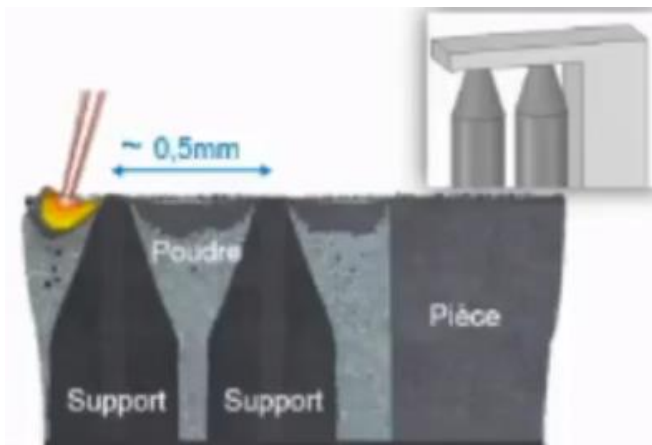


Scorie lors d'impression de porte à faux
(Imprimé sous L-PBF par MAQ-3D)

Fusion LASER sur lit de poudre

Laser Powder Bed Fusion L-PBF

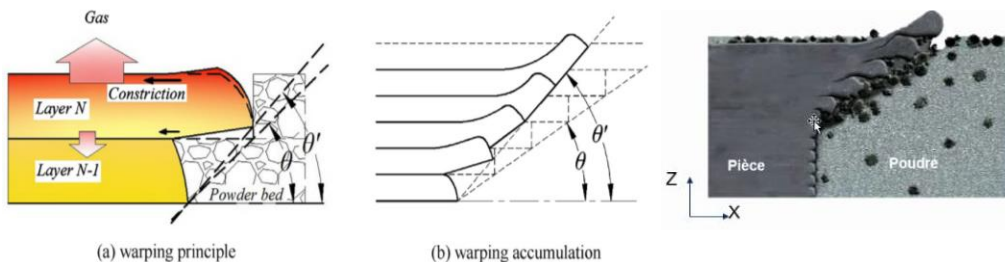
- Solution pour éviter les scories
 - La surface de porte à faux ne doit pas excéder 0,5mm
 - L'angle maximal par rapport au plateau de production est de 45°



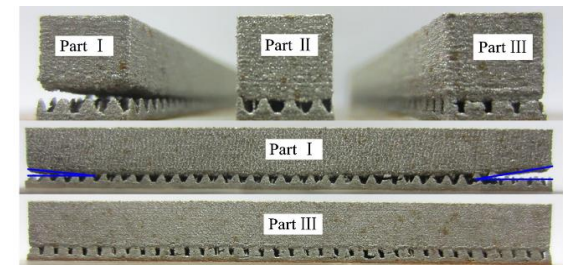
Fusion LASER sur lit de poudre

Laser Powder Bed Fusion L-PBF

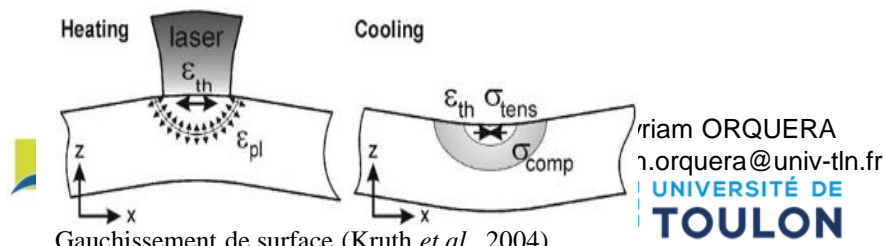
- Problématiques de la technologie
 - Gauchissement (Warping) :
 - La poudre fait office d'isolant thermique
 - retrait de la matière lors du refroidissement de la pièce
 - Les couches en porte à faux refroidiront en dernier lieu ainsi que la dernière couche
- => Cela crée des contraintes résiduelles, des défauts géométriques



Déformation plastique des surfaces en porte à faux dû au gauchissement (Wang *et al.*, 2013)



Impact du support sur le gauchissement (Liu, Yang and Wang, 2016)

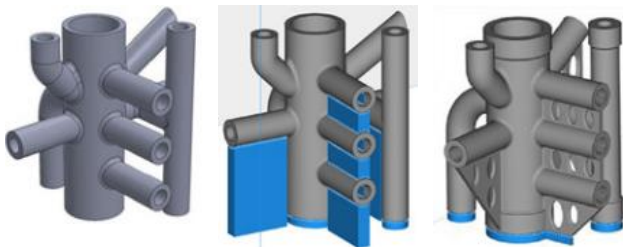


Gauchissement de surface (Kruth *et al.*, 2004)

Fusion LASER sur lit de poudre

Laser Powder Bed Fusion L-PBF

- Solutions pour éviter le gauchissement
 - Il faut de la matière solide sous les zones fusionnées pour
 - évacuer la chaleur
 - Empêcher le soulèvement de la matière fusionnée
 - Cette matière solide peut être
 - Le plateau
 - Des supports
 - Des surfaces « auto-portantes »
 - Des astuces de conception



Rajout de nervures comme support de la tuyauterie, [Diegel et al., 2020]



Surfaces autoportantes, resources.renishaw.com



Supports nécessaires pour la fabrication

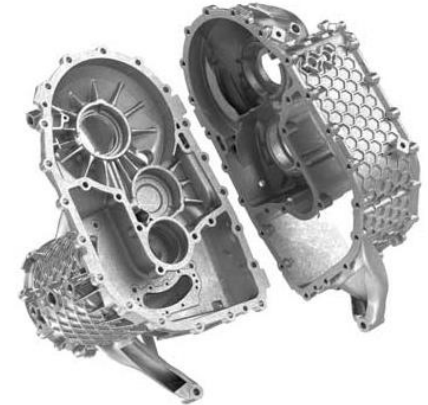
Fusion LASER sur lit de poudre

Laser Powder Bed Fusion L-PBF

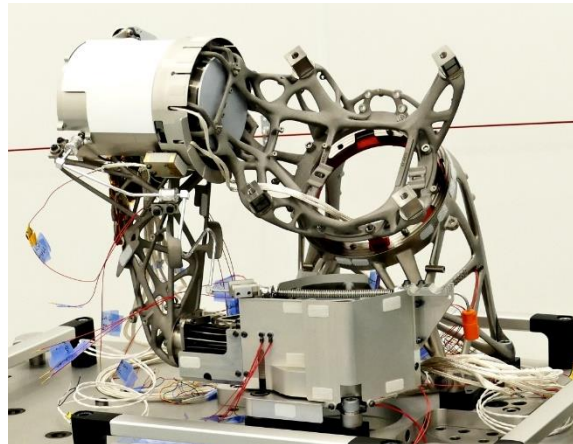
- Exemples d'application



Etrier de frein, bugatti.com



Carter de transmission électrique pour une Porsche, www.slm-pushing-the-limits.com



Mécanisme de propulsion électrique (ETHM), thalesgroup.com

FUSION SUR LIT DE POUDRE

Powder Bed Fusion (PBF)

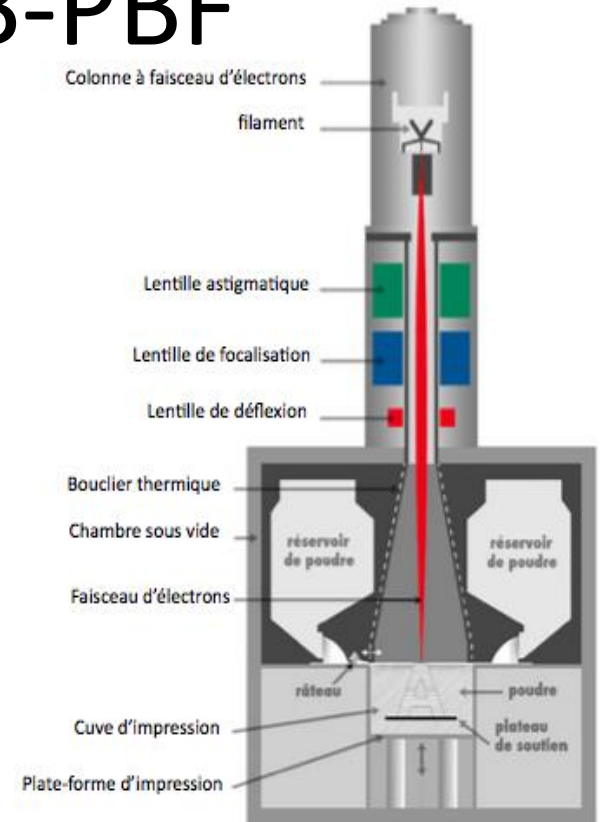
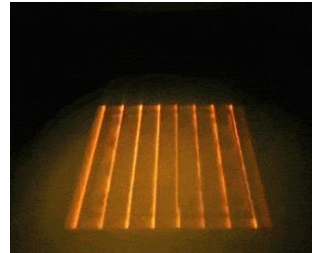
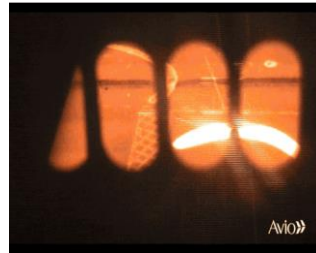
- 2 familles de PBF métallique
 - Fusion LASER sur lit de poudre
 - Fusion par FAISCEAUX d'ELECTRONS sur lit de poudre

Fusion par FAISCEAU d'ELECTRONS

Electron beam EB-PBF

- Appellations
 - EBM (Electron Beam Melting)
 - EB-PBF (Electron Beam Powder Bed Fusion)

- Principe



Jusqu'à la dernière couche

Mise sous vide
de l'enceinte



REPMO 3D

Fabrication Additive Métal

Fusion par FAISCEAU d'ELECTRONS

Electron beam EB-PBF

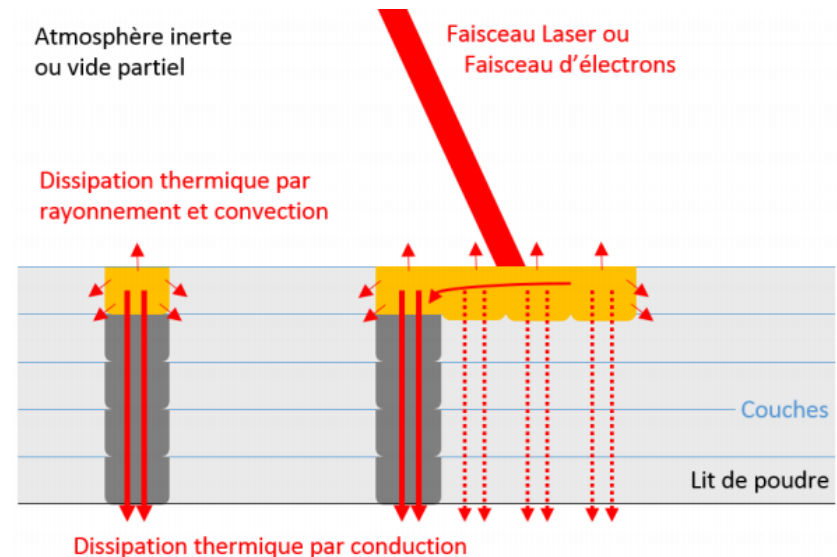


Fusion par FAISCEAU d'ELECTRONS

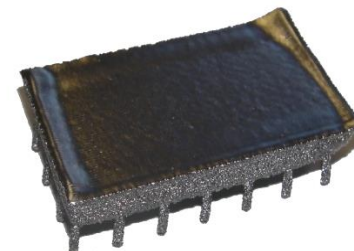
Electron beam EB-PBF

- Problématiques de la technologie
 - Poudre autoportante donc pas de scories
 - MAIS fort apport de chaleur
- => gauchissement (warping)

- Solution
 - Supports pour dissiper l'énergie thermique



Exemple de dissipation thermique pour des formes à éviter. Source (Vayre, 2014)



Fusion par FAISCEAU d'ELECTRONS

Electron beam EB-PBF

- Exemple d'application



Corps de refroidisseur



Implants orthopédiques, www.ge.com

Comparaison L-PBF vs EB-PBF

- Avantages du LBM par rapport à l'EBM
 - Caractéristiques mécaniques un peu meilleures
 - État de surface meilleur (Ra de 16 μm contre 26 μm)
 - Épaisseur des strates (couches) plus fines
 - Complexité et détails des pièces plus important
 - Enlèvement de la poudre plus facile
 - Temps de refroidissement deux fois plus court
 - Matériaux non-conducteurs possibles
 - Choix de matériaux important (une vingtaine)

Comparaison L-PBF vs EB-PBF

- Avantages de l'EBM par rapport au LBM
 - Pas de traitement thermique nécessaire
 - Peu de supports nécessaires
 - Supports très faciles à enlever
 - Bon pour les pièces massives
 - Fabrication sous vide
 - Meilleure production (rapidité + empilement des pièces)

Dépôt de matière sous énergie concentrée

Direct Energy Deposition (DED)

- 2 familles de DED

- Construction Laser Additive Directe (CLAD)

- Autres appellations

- LDT (Laser Direct Technology)
 - LMD (Laser Metal Deposition)
 - Laser Powder DED (LP-DED)

- Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)

- Autres appellations

- Arc Wire DED (AW-DED)

CLAD (Construction Laser Additive Directe)

- Principe



CLAD (Construction Laser Additive Directe)

- Exemples d'application



Conduits aéronautiques obtenus par projection de poudres (Le Bourhis, 2014)



Pièce d'essai, www.irepa-laser.com

Dépôt de matière sous énergie concentrée

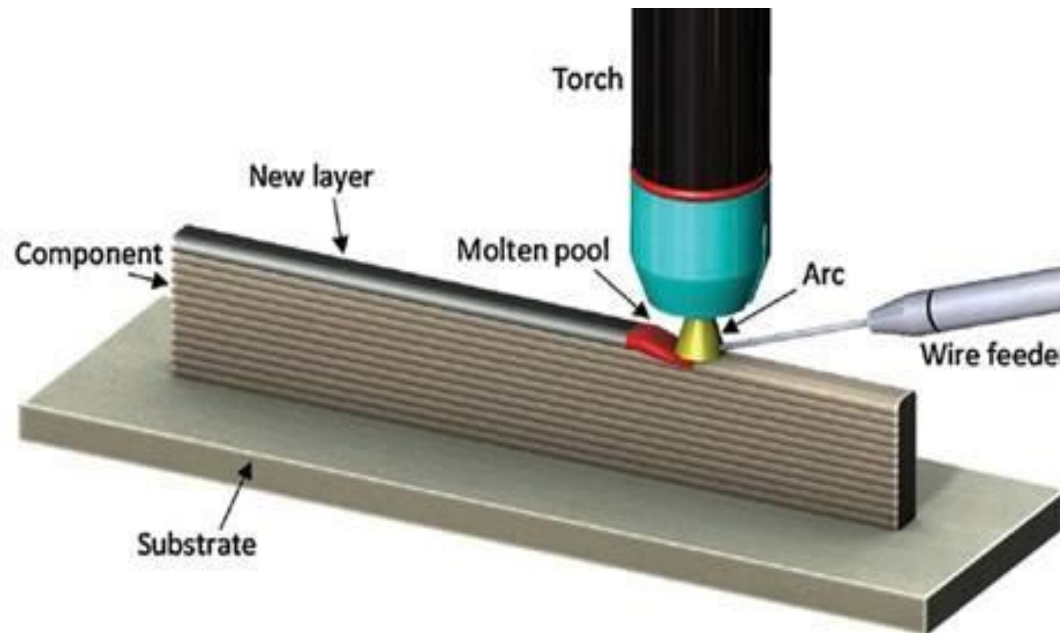
Direct Energy Deposition (DED)

- 2 familles de DED métallique
 - Construction Laser Additive Directe (CLAD)
 - Autres appellations
 - LDT (Laser Direct Technology)
 - LMD (Laser Metal Deposition)
 - Laser Powder DED (LP-DED)

- Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)
 - Autres appellations
 - Arc Wire DED (AW-DED)

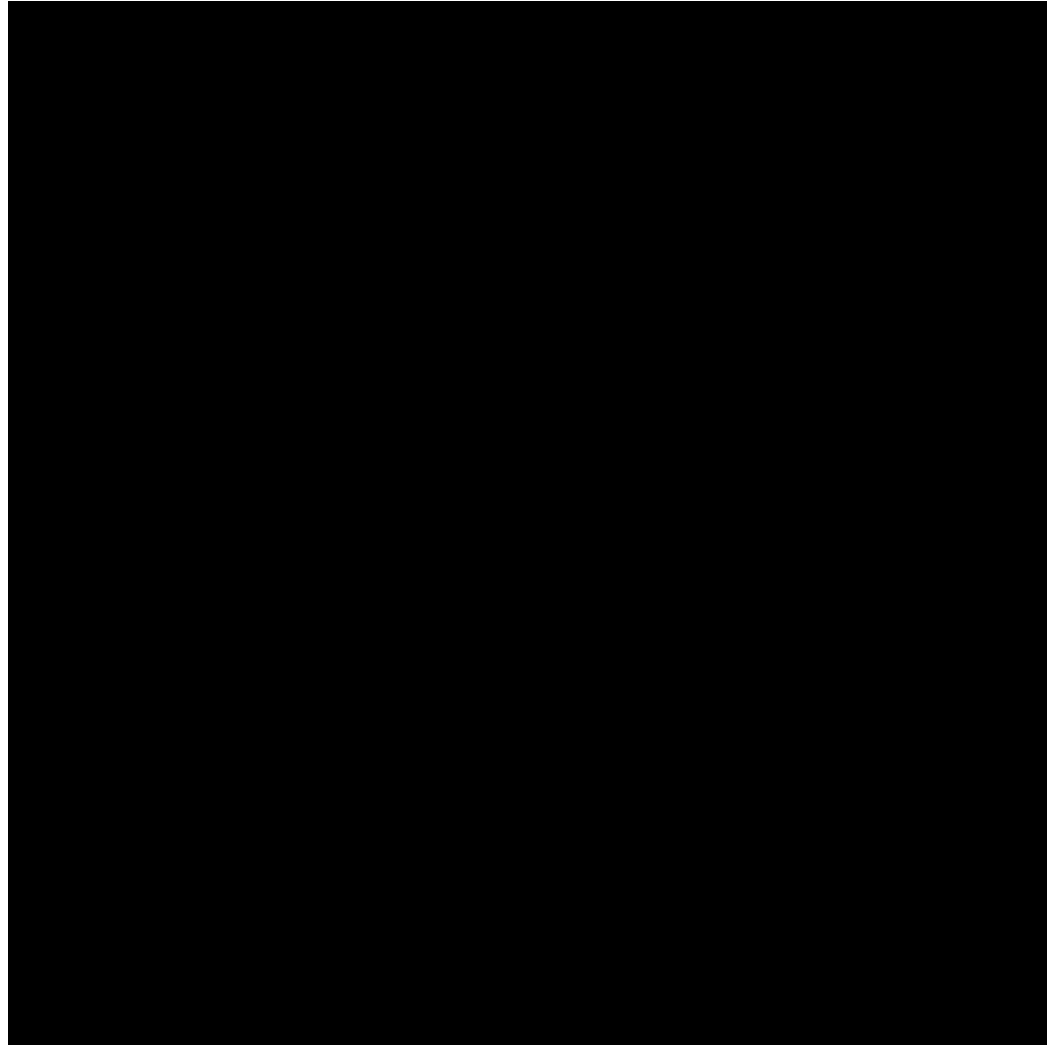
Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)

- Principe
 - Le WAAM est définis comme la combinaison d'un arc électrique utilisé comme source de chaleur et d'un fil utilisé comme apport de matières première



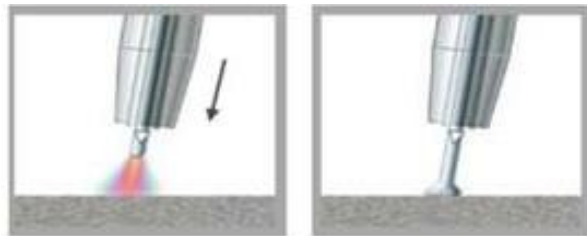
Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)

- Principe



Wire Arce Additive Manufacturing (WAAM)

- Principe du WAAM-CMT, un procédé dérivé du MIG

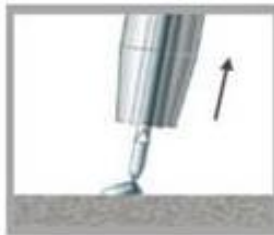


Etape 1 :

Durant la phase de fusion, le fil (métal d'apport) est guidé vers le bain de fusion

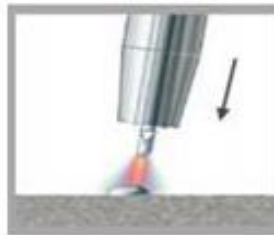
Etape 2 :

L'arc électrique s'éteint lorsque le fil est plongé dans le bain de fusion. L'intensité de soudage est abaissée. C'est la phase de court-circuit.



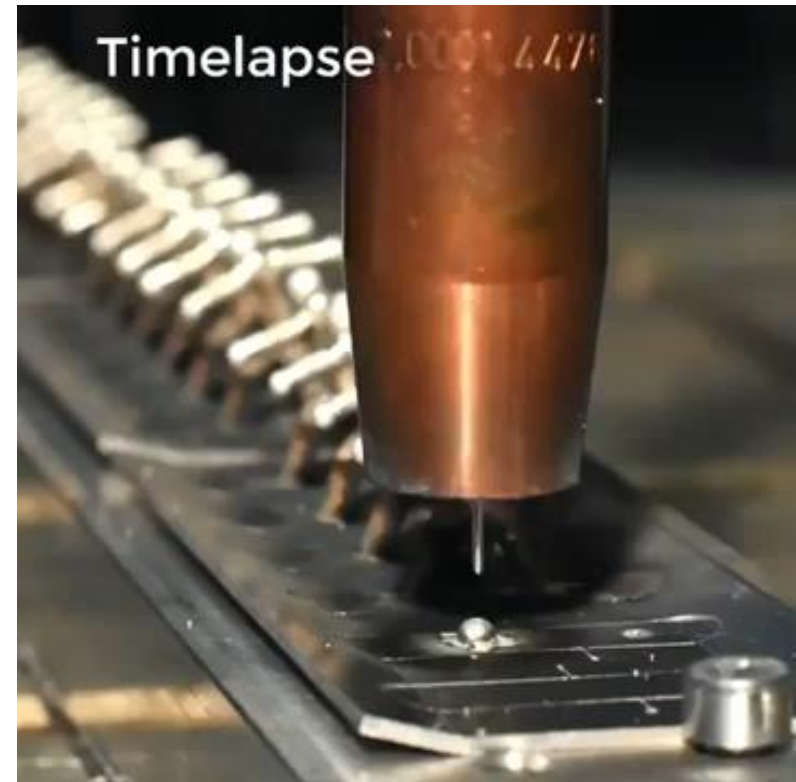
Etape 3 :

Le mouvement de recul du fil entraîne le détachement de la goutte. Le courant de court-circuit est maintenu à une faible intensité



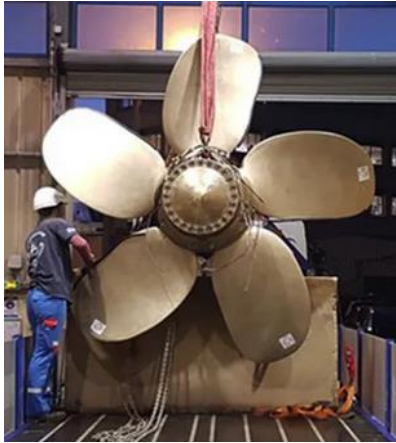
Etape 4 :

Le mouvement du fil est inversé et le processus recommence.



Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)

- Exemple d'application



Hélice installée en 2021 sur un bateau de la marine nationale



Pont en acier imprimé par WAAM installé dans la ville d'Amsterdam par la société MX3D



Crochet métallique, [Image credit: Huisman Equipment]



Cadre de vélo, www.erm-fabtest.com

Dépôt de matière sous énergie concentrée

Direct Energy Deposition (DED)

- Particularité du DED
 - Pas de possibilité de support: toutes les surfaces doivent être autoportantes
 - Possibilité de réparer des pièces métalliques endommagées
 - Fabrication « hybride » possible



Dépôt de matière sous énergie concentrée

Direct Energy Deposition (DED)

- Quelques avantages et inconvénients
 - + Ajout de fonction – réparation
 - + Possibilité de réaliser des pièces multi matériaux
 - + Dimension des pièces pouvant être très grande
 - + Diminution du ratio « buy to fly »
 - Qualité de l'état de surface médiocre
 - Temps de fabrication long
 - Forme des pièces peu complexe

Extrusion de matière de type BMD

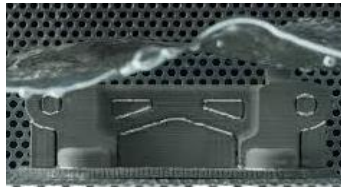
Bound Metal Deposition

- Principe

- Basé sur le principe de la FdM (Imprimante 3D par dépôt de fil)
- Matière première sous forme de tige (mélange de poudre de métal maintenu par un liant de cire et de polymère)

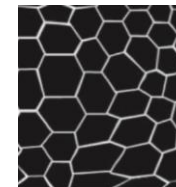


Jusqu'à la dernière couche



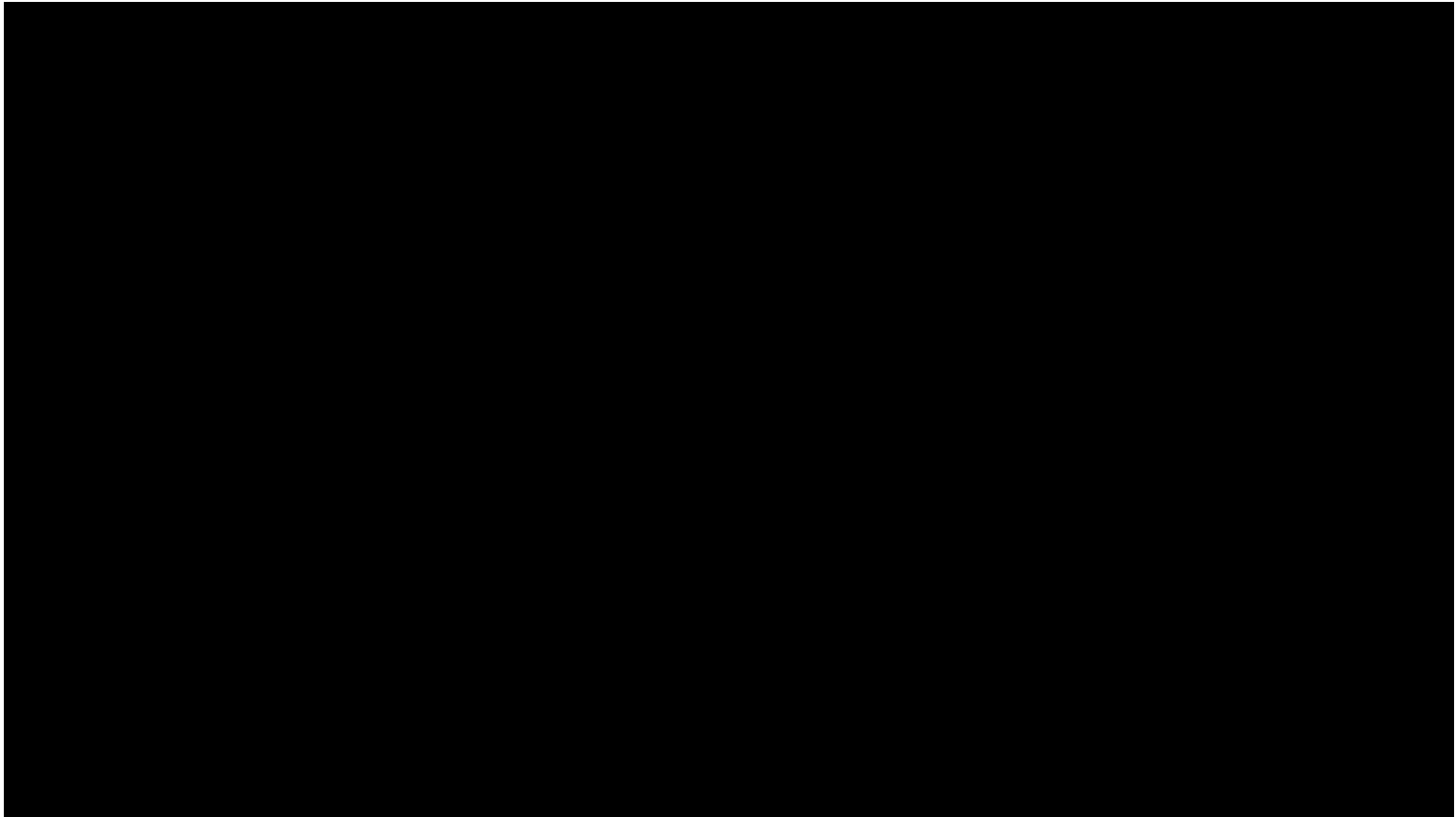
→ Pièce brute finit

Impression de la pièce verte



Extrusion de matière de type BMD Bound Metal Deposition

- Principe



Extrusion de matière de type BMD

Bound Metal Deposition

- Exemple d'application



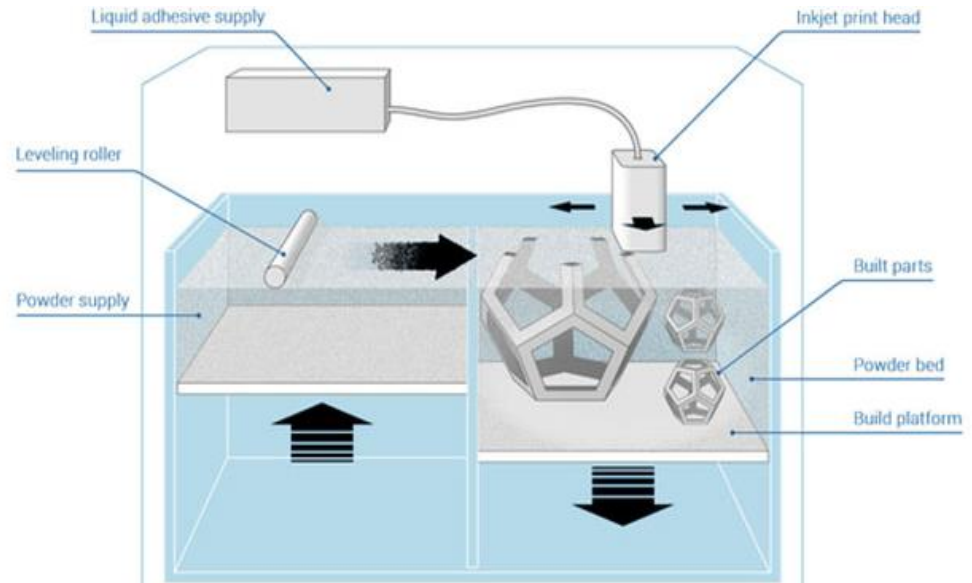
- Avantage / inconvénient

- + Moins de danger pour l'opérateur car pas de contact avec la poudre
- Lors de post-traitement le retrait des surfaces crée une déformation (stade peu maîtrisé actuellement)
- Épaisseur de la peau de 3mm maximum pour permettre au liant d'être évacuer, ainsi, l'intérieur des pièces est obligatoirement en treillis.

PROJECTION DE LIANT METALLIQUE

Metal Binder Jetting (MBJ)

- Principe



Jusqu'à la dernière couche

Impression de la
pièce verte



→ Pièce
brute
fini



PROJECTION DE LIANT METALLIQUE

Metal Binder Jetting (MBJ)

- Principe

PROJECTION DE LIANT METALLIQUE

Metal Binder Jetting (MBJ)

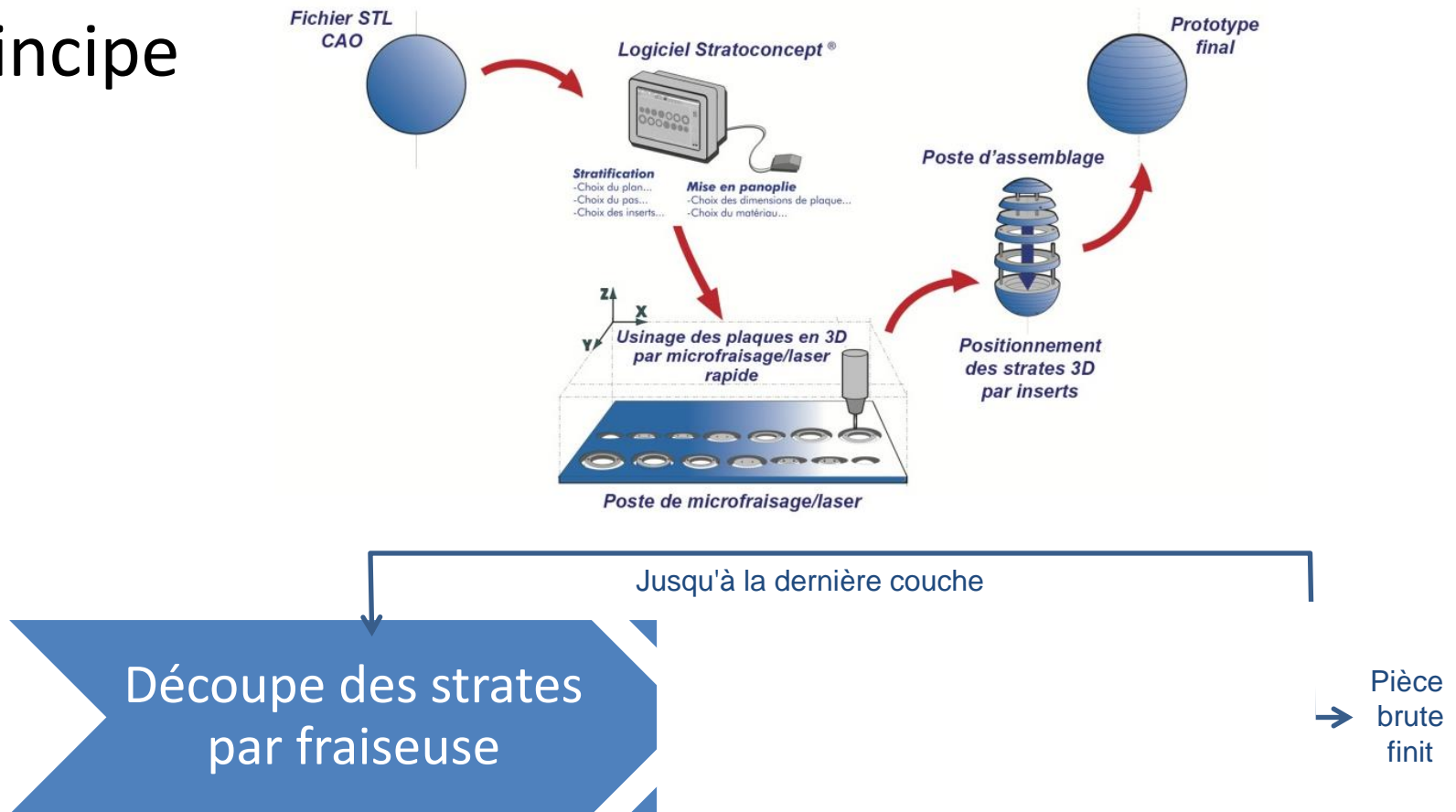
- Exemple d'application
- Avantage / inconvénient
 - + Grande productivité
 - + Pas besoin de support
 - + Grande finition
 - Lors du frittage le retrait des surfaces créé une déformation entre 20 à 40%
 - Dimensions des pièces faibles



STRATIFICATION DE COUCHES

Laminated Object Manufacturing (LOM)

- Principe



STRATIFICATION DE COUCHES

Laminated Object Manufacturing (LOM)

- Principe



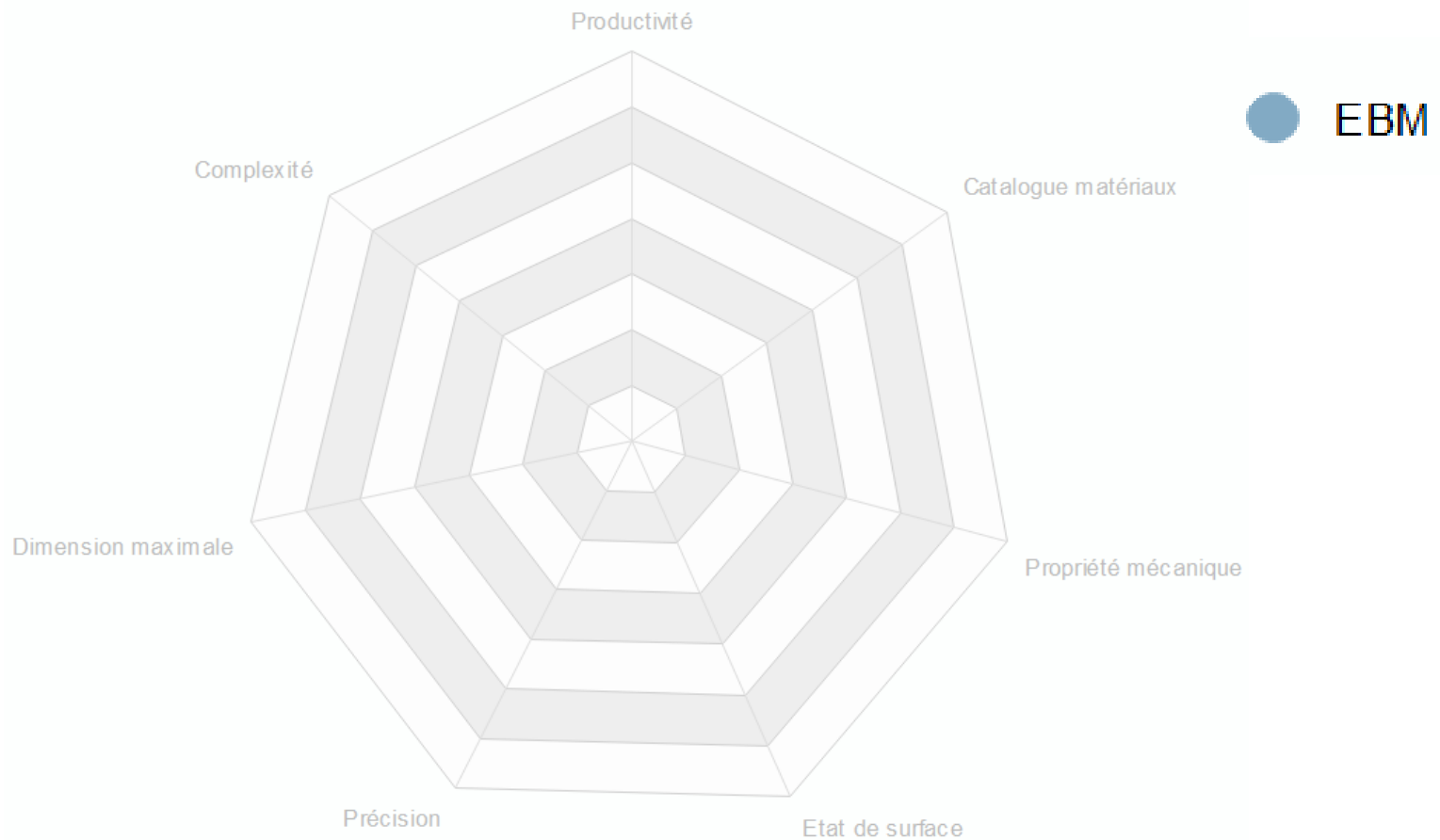
STRATIFICATION DE COUCHES

Laminated Object Manufacturing (LOM)

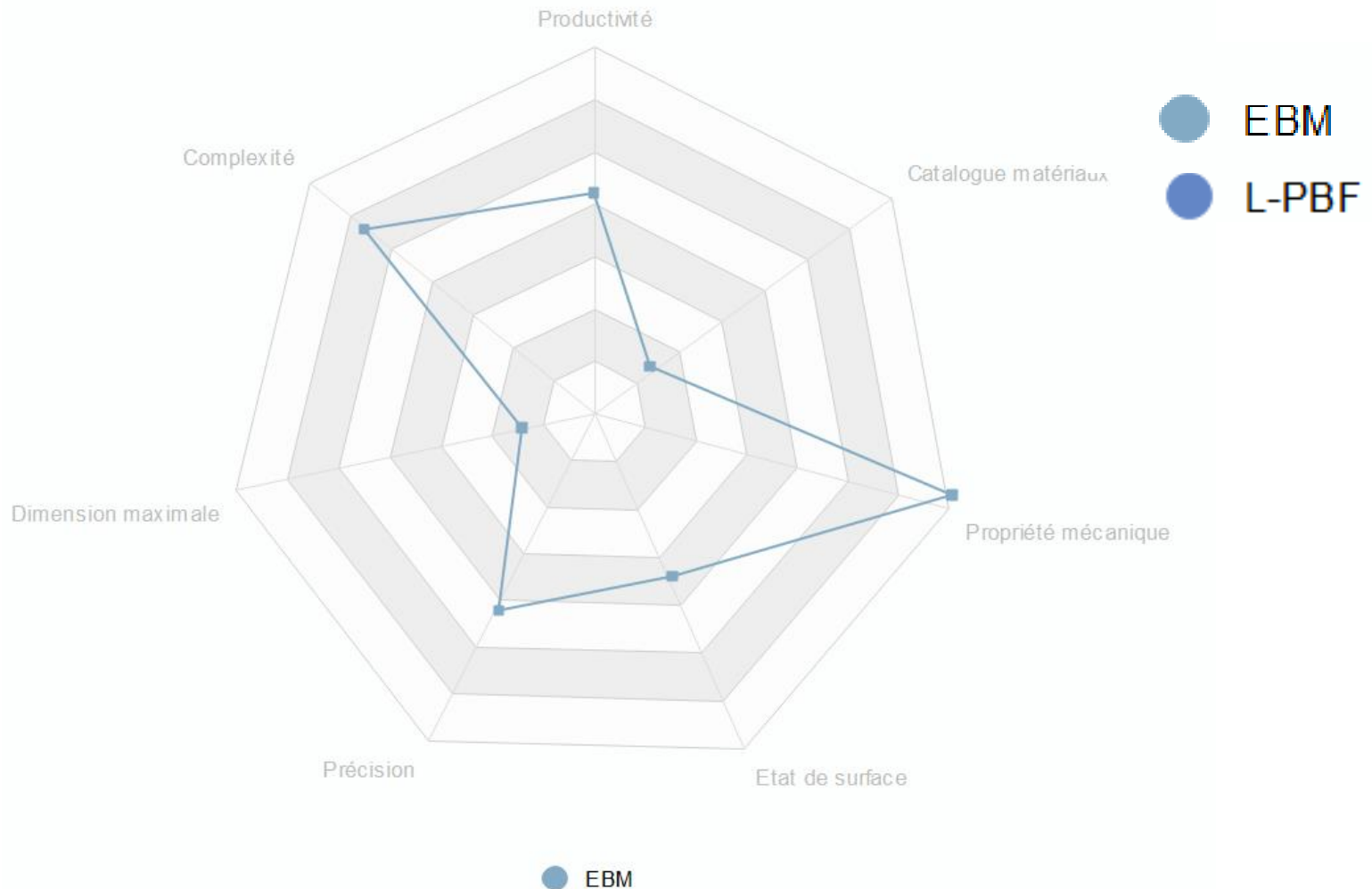
- Exemple d'application
- Avantages et inconvénients
 - + Grandes pièces
 - + Matériaux très divers
 - + Coût machine et de production très raisonnable
 - + Facilité d'approvisionnement matière
 - + Temps de réalisation des pièces réduit
 - Besoin de finition (joints de plaques)
 - La mise en place de strates fastidieuse



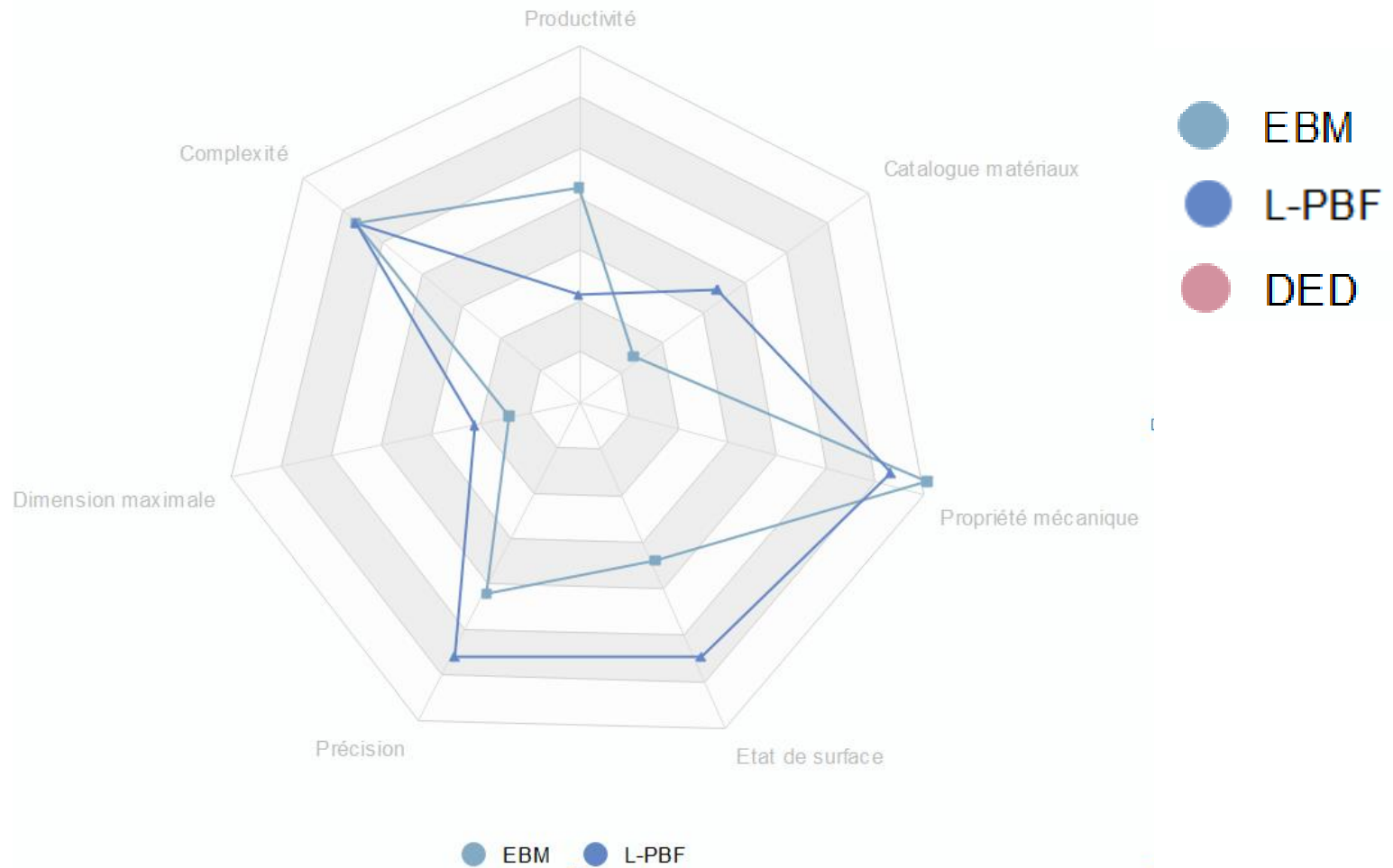
COMPARAISON ENTRE PROCÉDES ADDITIFS METALLIQUES



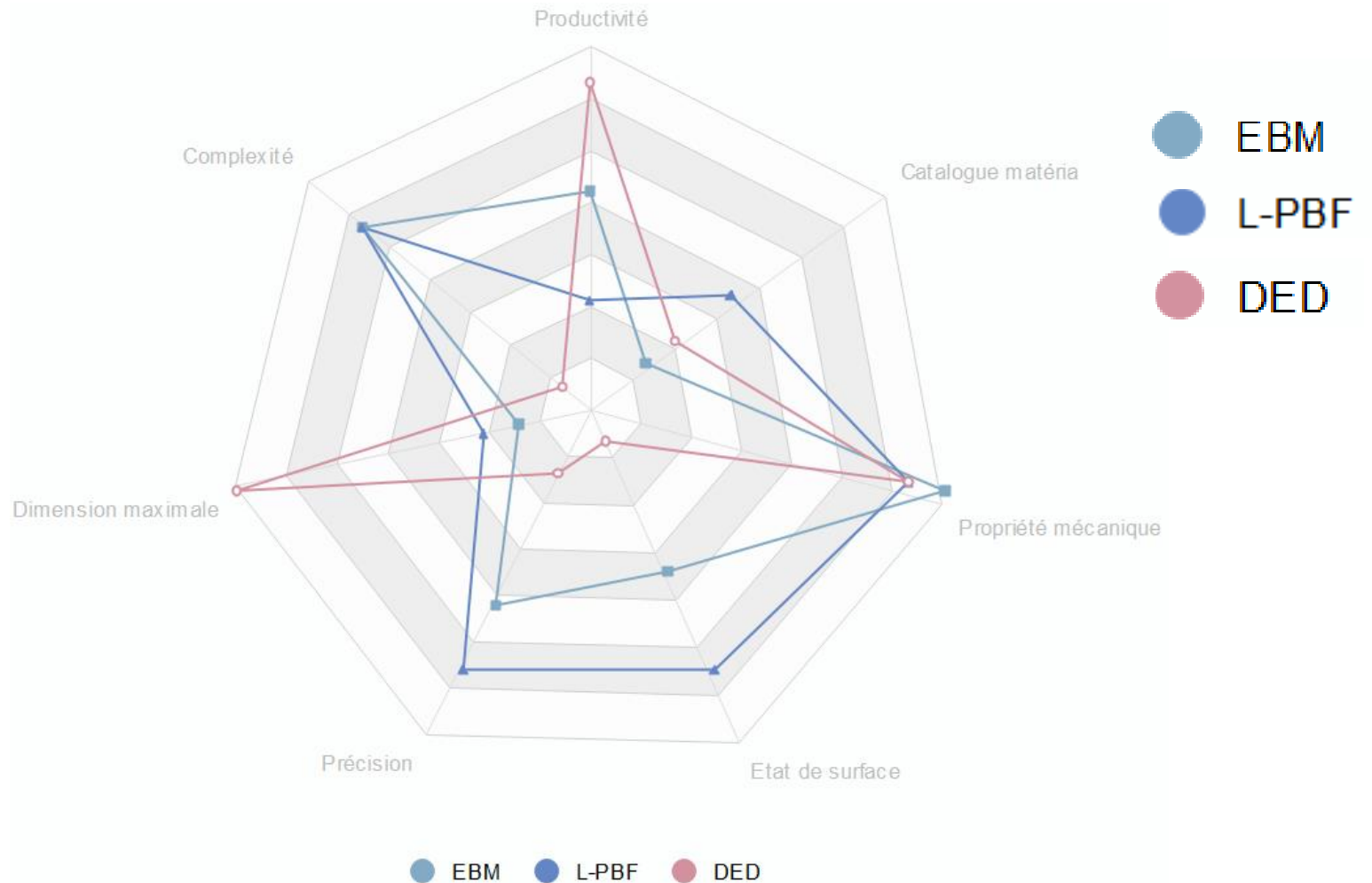
COMPARAISON ENTRE PROCÉDES ADDITIFS METALLIQUES



COMPARAISON ENTRE PROCÉDES ADDITIFS METALLIQUES



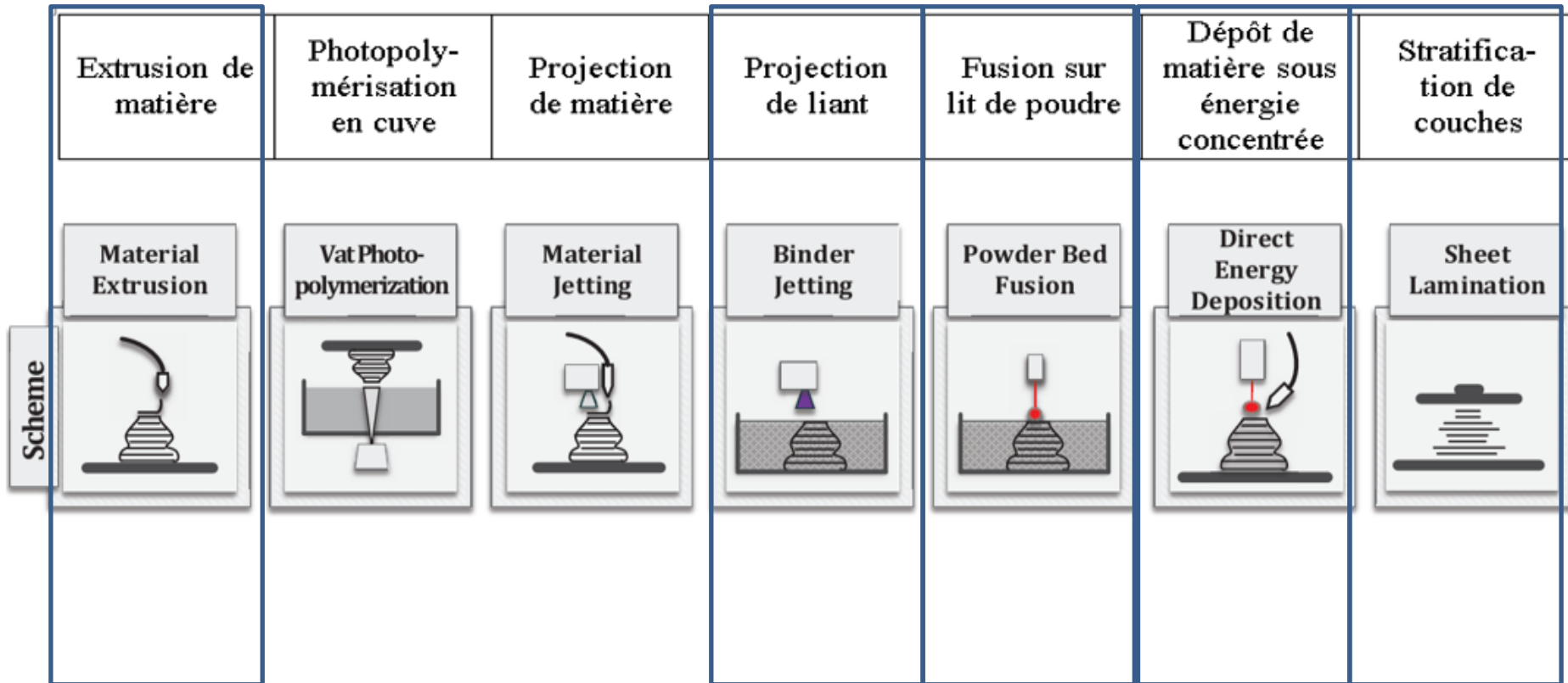
COMPARAISON ENTRE PROCÉDES ADDITIFS METALLIQUES



LES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS

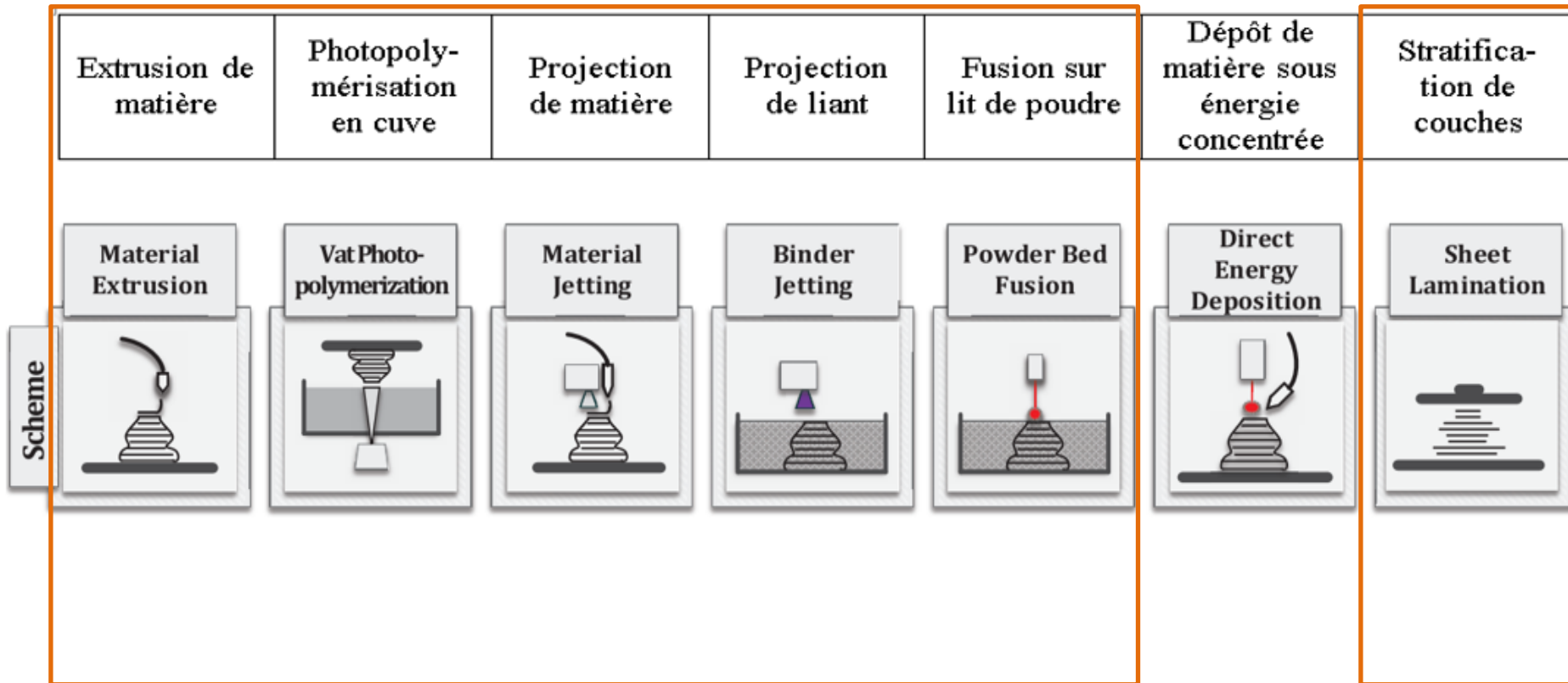
- Il existe 7 procédés de FA référencés par la norme

FA Métallique



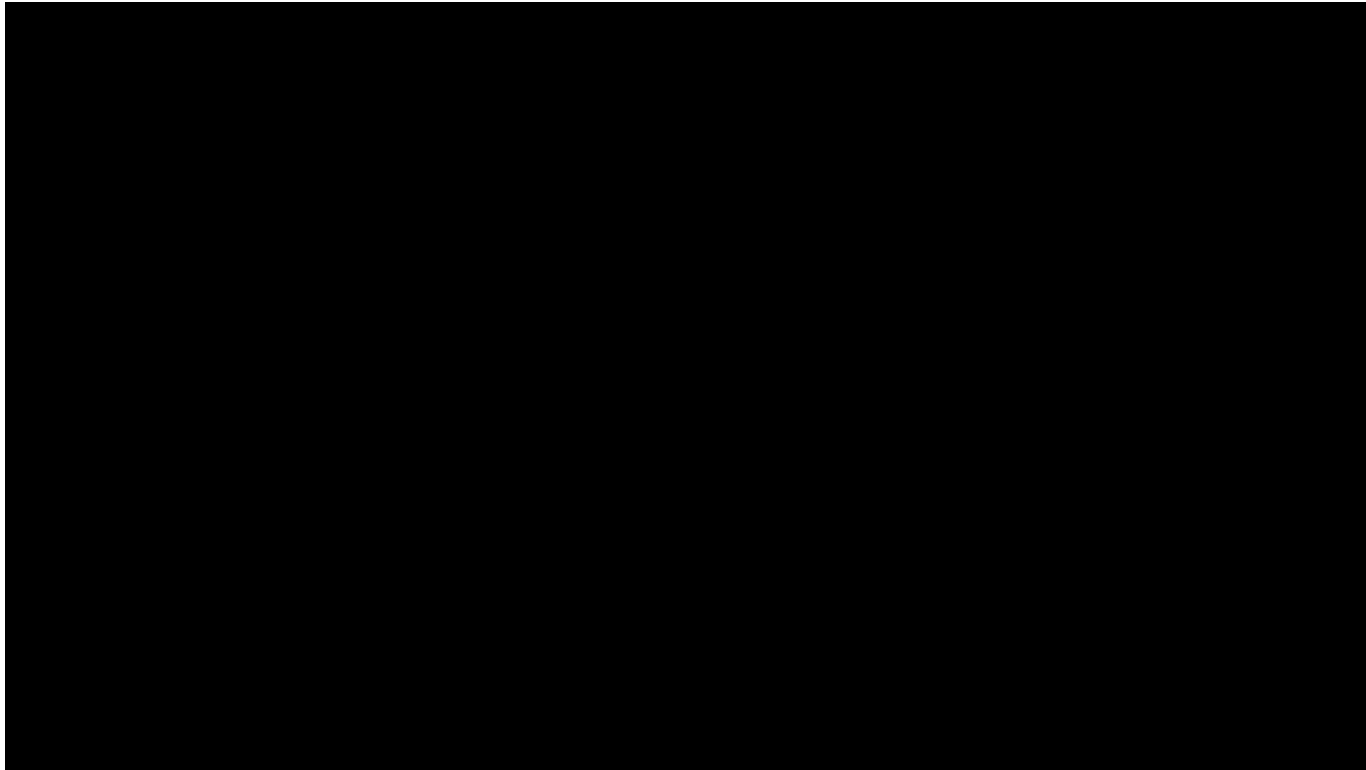
LES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS

- Il existe 7 procédés de FA référencés par la norme **FA Plastique et autre**



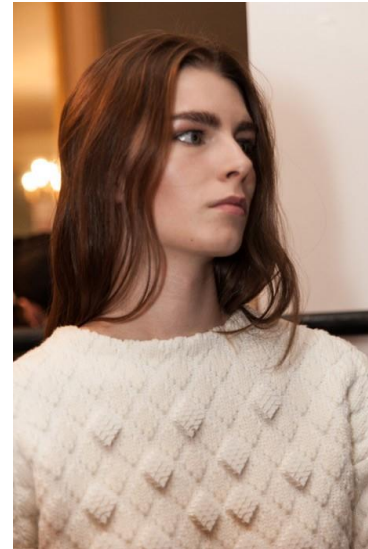
Fusion sur lit de poudre

Selective Laser Sintering SLS



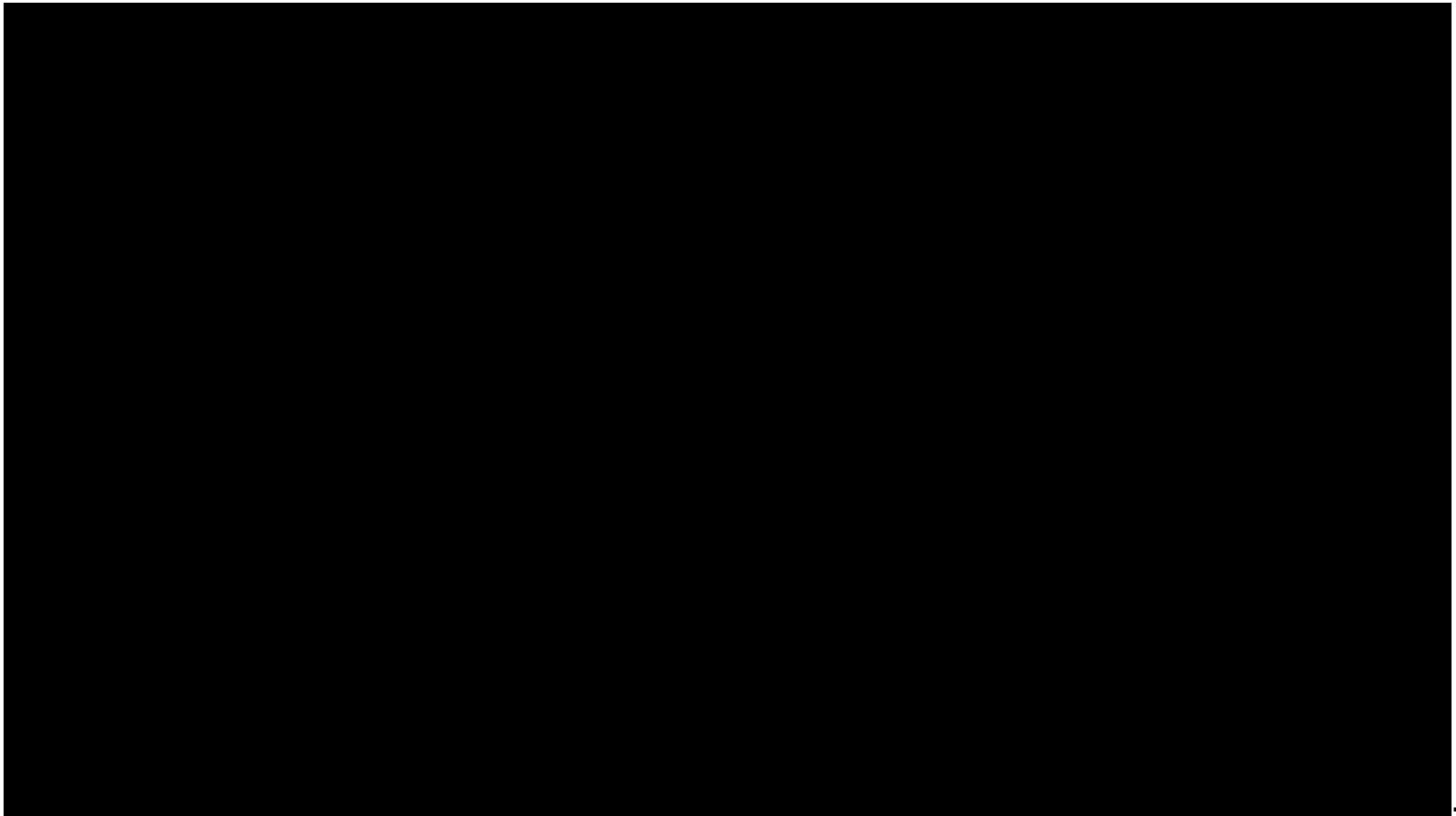
Fusion sur lit de poudre Selective Laser Sintering SLS

- Exemple d'application



Extrusion de matière

- **FDM Fused Deposition Modelling**



Extrusion de matière

- **Enlèvement du support**

(Lefebvre 2015)

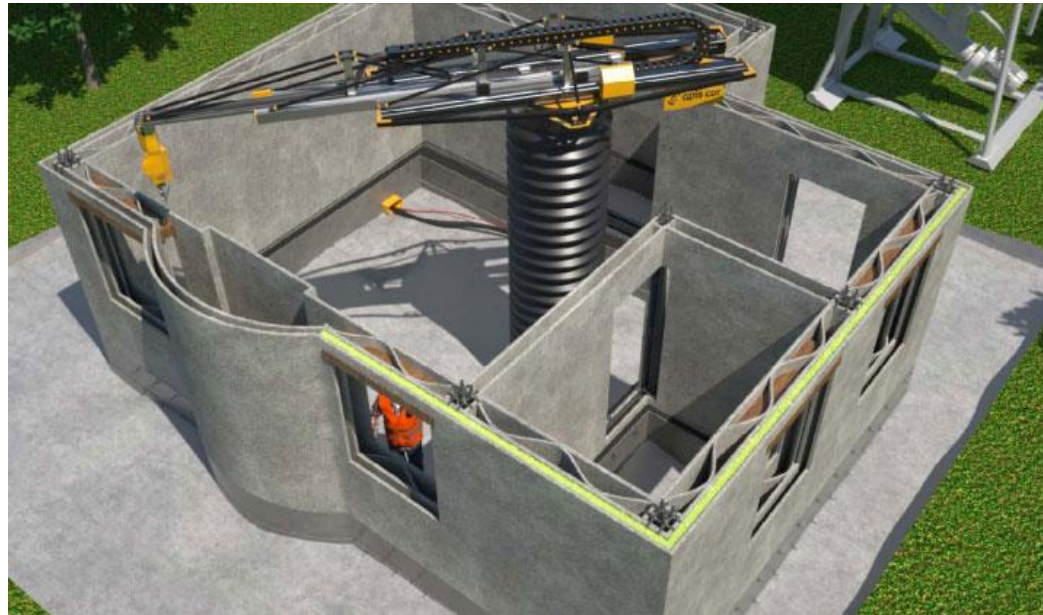
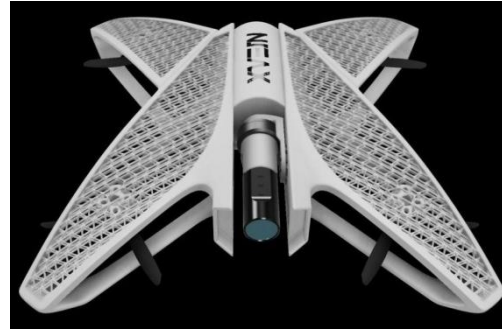


- Nécessité de support à partir d'un certain porte à faux
- Enlèvement à la main puis dans un bain de produit diluant

- **Matériaux**

- Plastique ; Nylon
- Bois; métal; nourriture...

Exemples d'application



AVANTAGES INCONVENIENTS

- + Procédé peu couteux
- + Dans le domaine du tout public
- + Suivant la matière (ULTEM ou Acier par exemple), peut être utilisée comme procédé de fabrication direct
- + Des supports solubles
- État de surface médiocre
- Comportement anisotrope (sauf après traitement thermique)
- Supports obligatoires

Projection de liant

- [Projection de liant / Binder Jetting](#)
- [Binder Jetting réel](#)

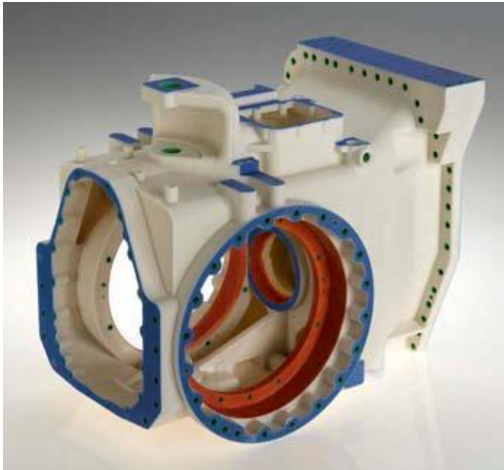
- Matériaux
 - polymère composite, métal, céramique

- Avantages/inconvénients
 - + Grande productivité
 - + pas de support
 - + Impression couleur
 - + possibilité de pièces souples

 - Pièces fragiles (de prototypage)
 - Toutes les formes des pièces ne sont pas possibles

Exemples d'application

- **Projection de liant / Binder Jetting**



Projection de matière

- Projection de matière (PolyJet, ou Multi Jet Modeling MJM...)
- **Enlèvement du support**
 - Résine à enlever à la main, puis par jet d'eau à haute pression
 - Ou bien nettoyage par ultrason
- **Matériaux**
 - Résines polymérisables



Avantages inconvénients

- + Très bonne qualité de surface
- + Bonne matière (en fonction de l'utilisation)
- + Mélange de plusieurs matériaux à caractéristiques variées
- + Formes réalisables très complexes
- Enlèvement du support par jet d'eau sous haute pression (détruit les parois fines)
- Vieillessement des pièces
- Coûteux

Exemples d'application

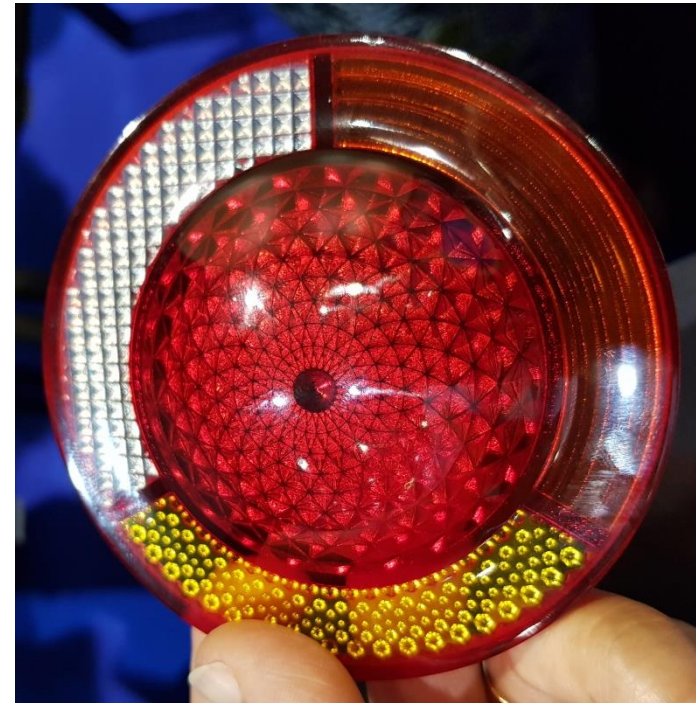


Photo polymérisation en cuve

Stéréolithographie SLA

- Stéréolithographie, SLA

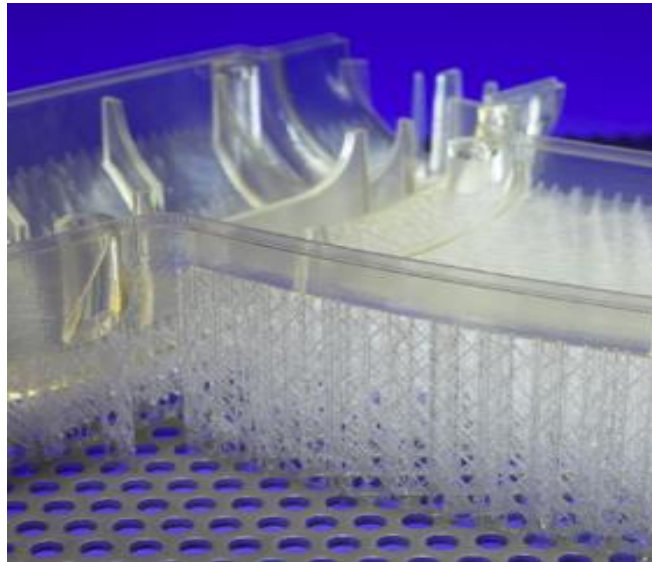


Photo polymérisation en cuve



Enlèvement du support

- L'enlèvement des supports est assez fastidieux car il est fait à la main



source : www.rtejournal.de

- Matériaux
 - Résines

Avantages et inconvénients

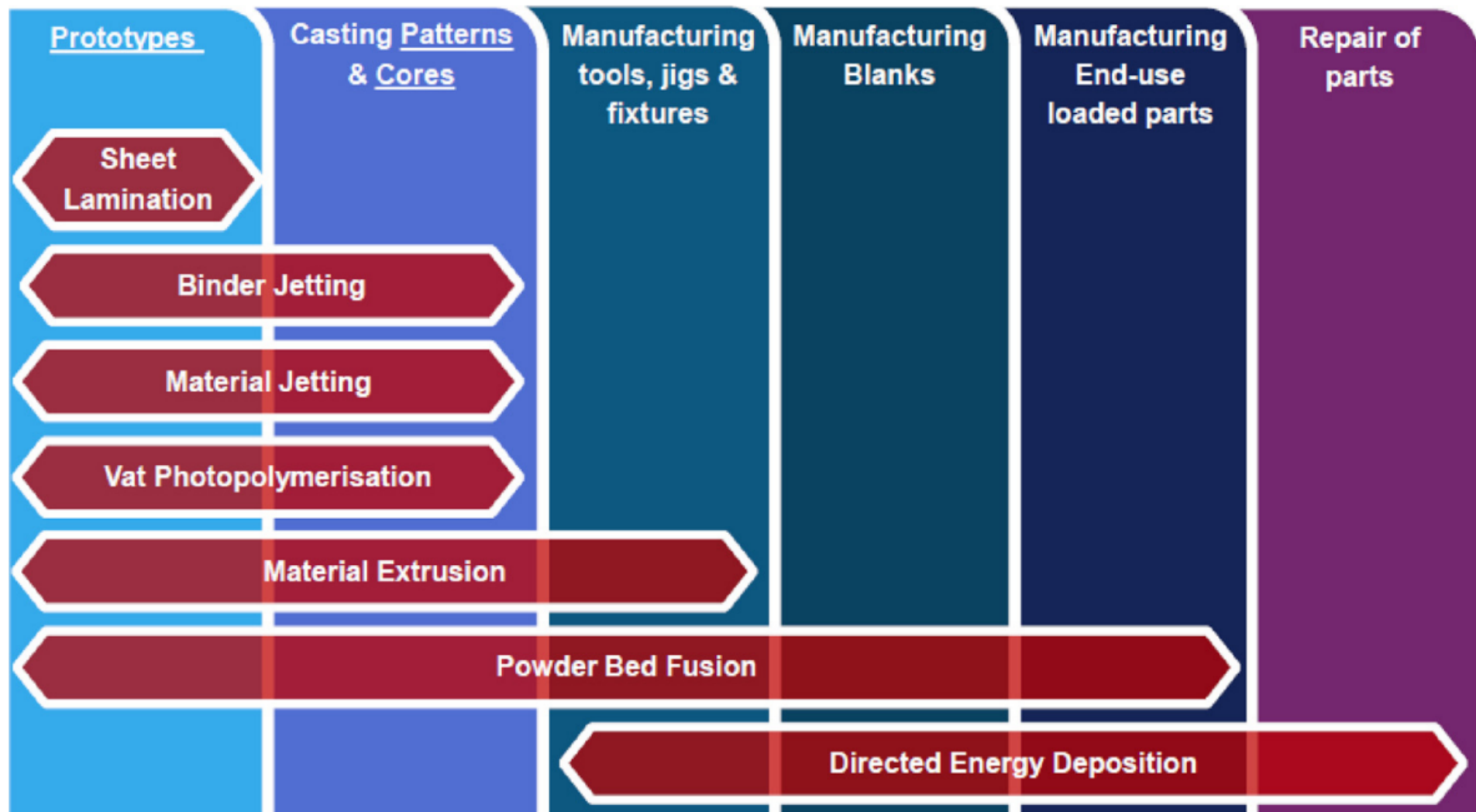
- + Rapide (surtout pour le DLP)
- + Précis
- + Possibilité de faire des moules
- + Translucidité
- + État de surface
- + Pièce de très grande dimension

Avantages et inconvénients

- Fragilité des modèles produits,
- Déformations introduites lors du séchage au four
- Nécessité de faire des finitions à la main (enlèvement du support fastidieux)
- Mauvais vieillissement des pièces

Exemples d'application

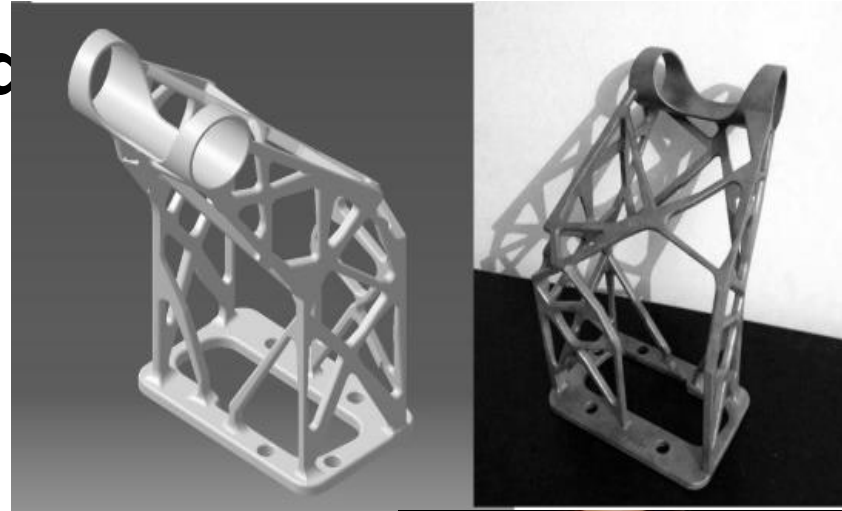
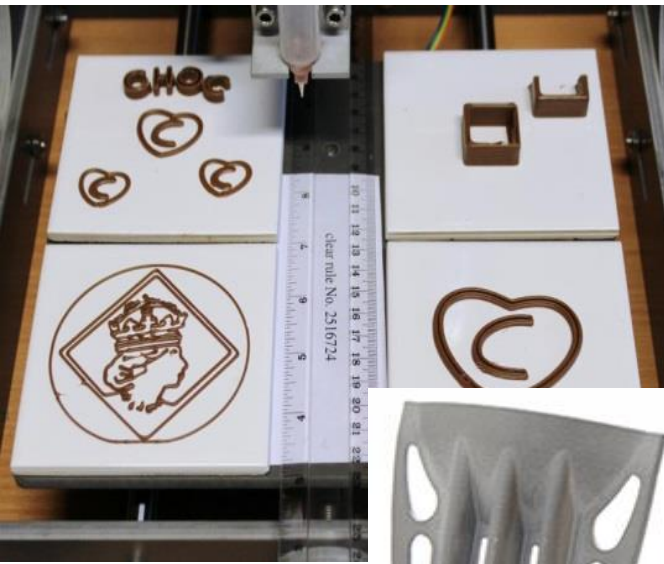




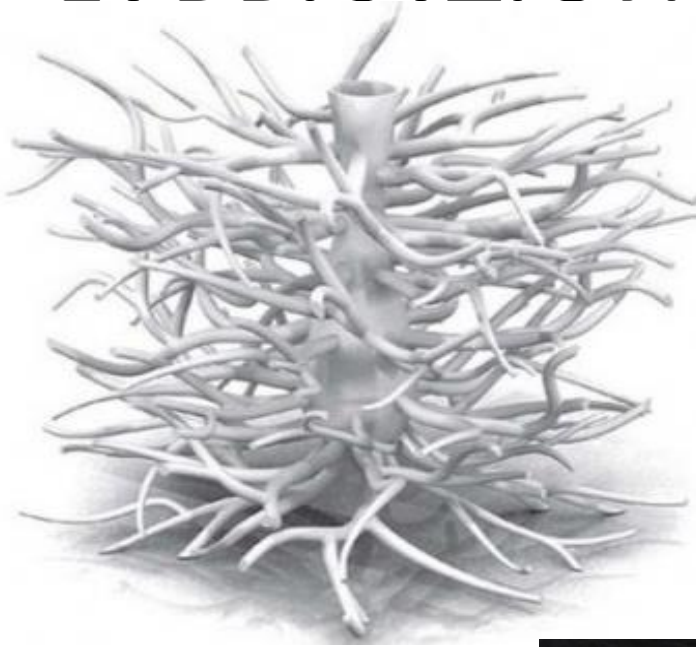
Technologies, A.C.F.o.A.M. and A.C.F.o.A.M.T.S.F.o. Terminology, Standard terminology for additive manufacturing technologies. ASTM International; 2012

CATION ADDITIVE

domaines d



ADDITIVE



The end