

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 :

- 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 différents procédés de fabrications

Par enlèvement de matière



Par déformation



Par fusion



Par ajout de matière

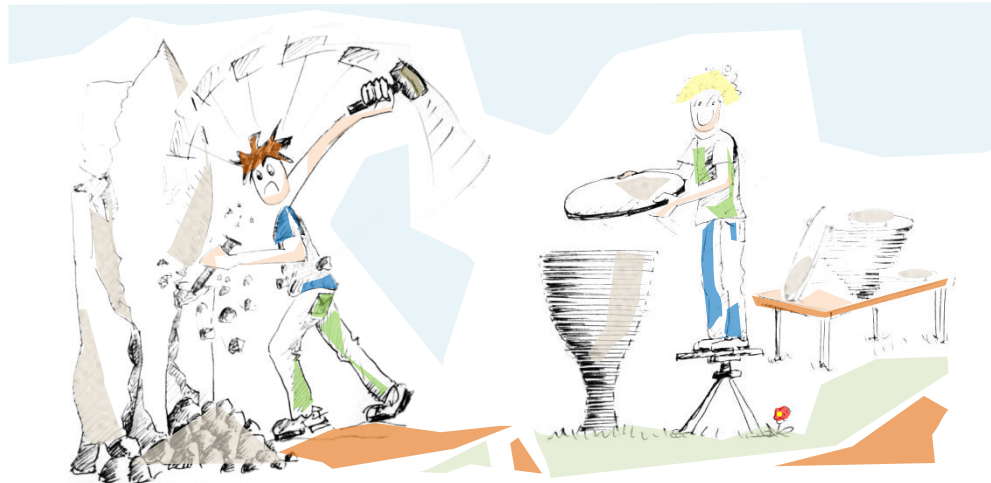


PROCÉDÉS DE FABRICATION

- **Par fabrication additive**

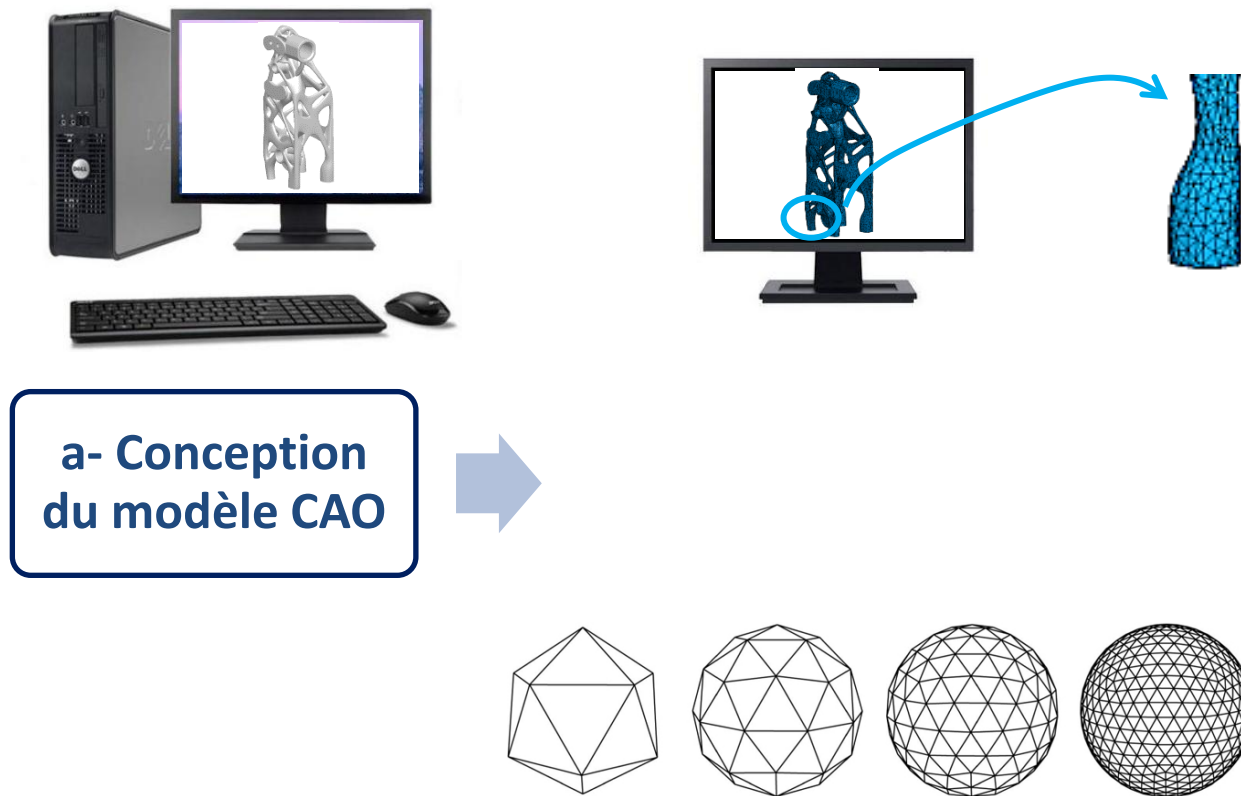
(Thompson et al. 2016)

“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



FABRICATION ADDITIVE

- **Principe du processus de fabrication additive**

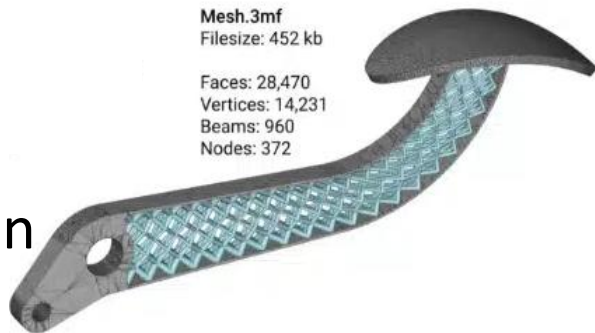
- Format STL créé en 1987

- ne contient que les informations de géométrie
 - Il faut 1 logiciel adapté pour le lire
 - Fichier lourd
 - Beaucoup de défauts



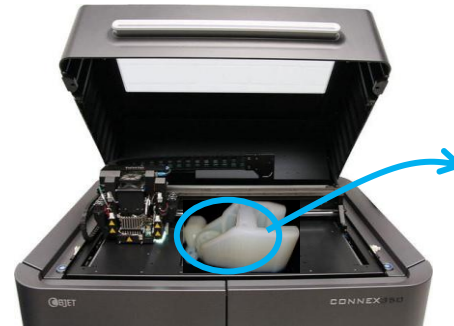
- Format 3MF (3D Manufacturing Format) standard depuis 2025

- Contient le modèle 3D (maillage)
 - Facilement lisible
 - Contient les Informations de fabrication
 - Les matériaux
 - Les couleurs et textures



FABRICATION ADDITIVE

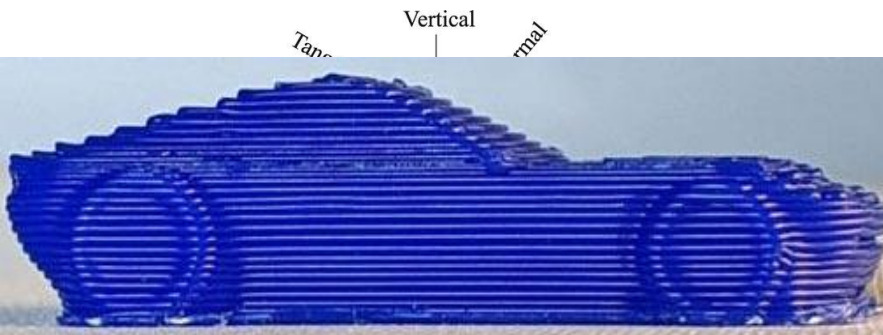
• Principe



Exemple pour la technologie Polyjet :
Enlèvement du support et taraudage



c- Mise en couche et
impression



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



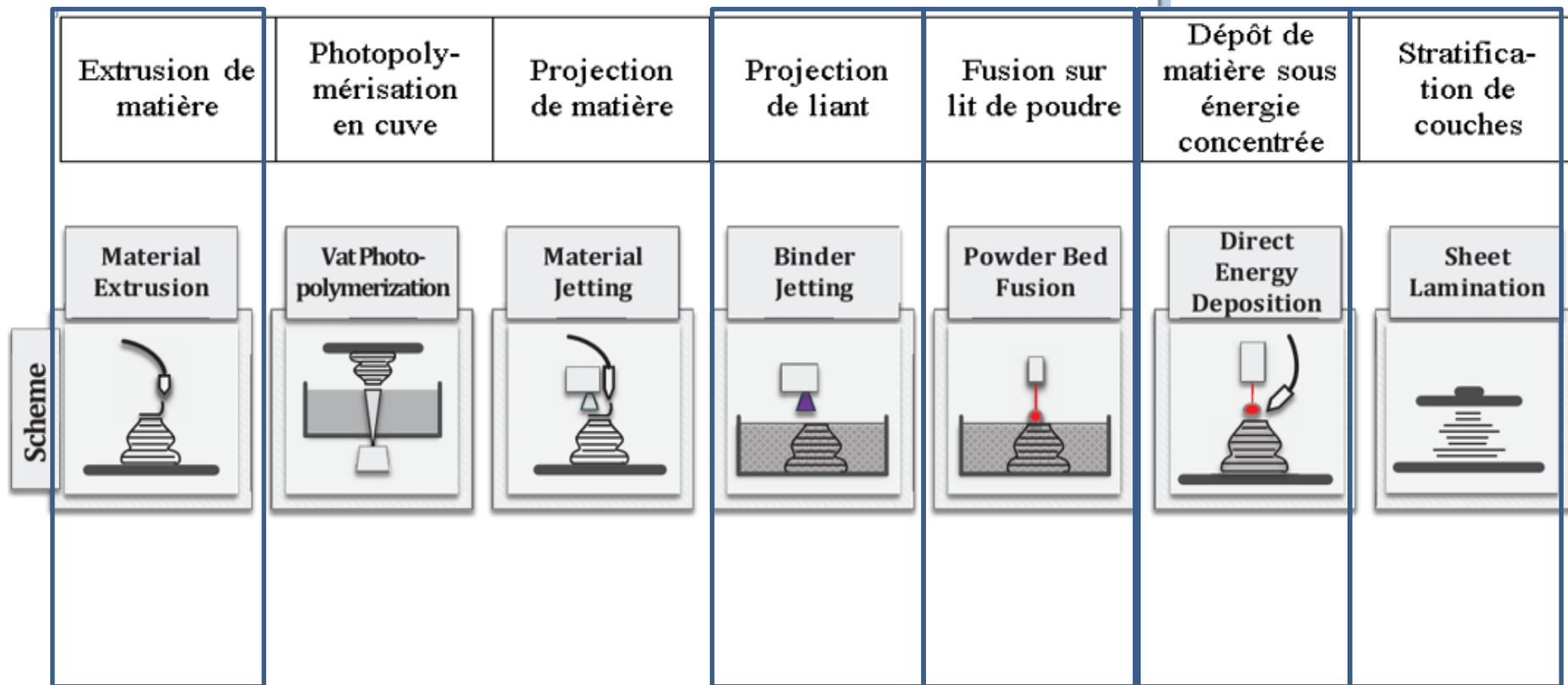
Exemple pour la technologie L-PBF :
Enlèvement du support, usinage et traitement de surface

.../...

LA FA MÉTALLIQUE

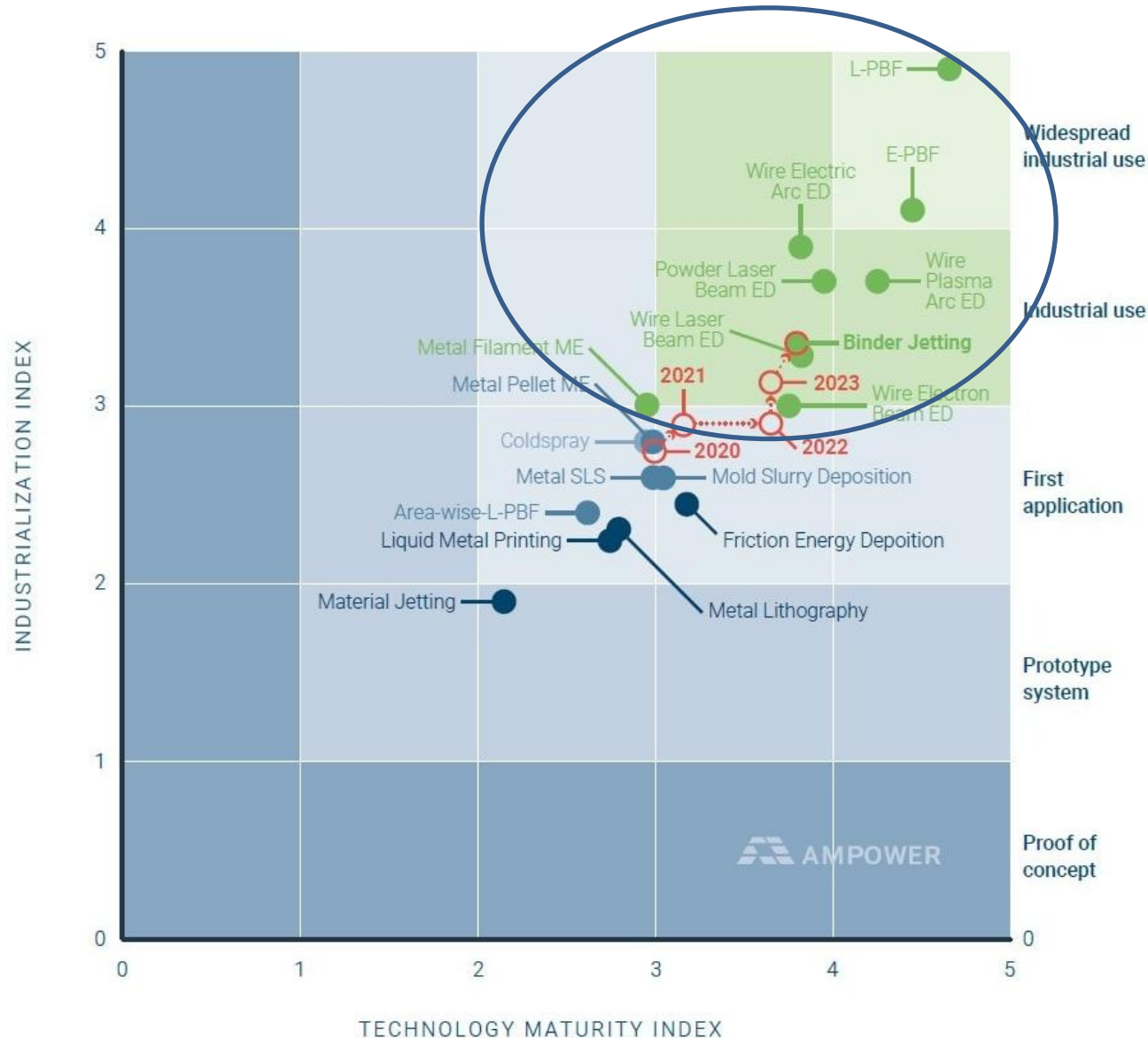
- Il existe 7 procédés de FA référencés par la norme NF ISO 17296-2

FA Métallique



LA FA MÉTALLIQUE

AMPOWER Maturity Index: Metal AM 2024



FUSION SUR LIT DE POUDRE

Powder Bed Fusion (PBF)

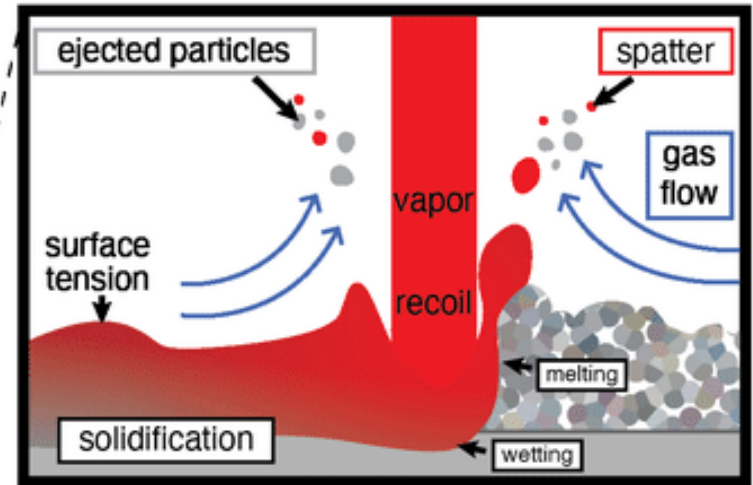
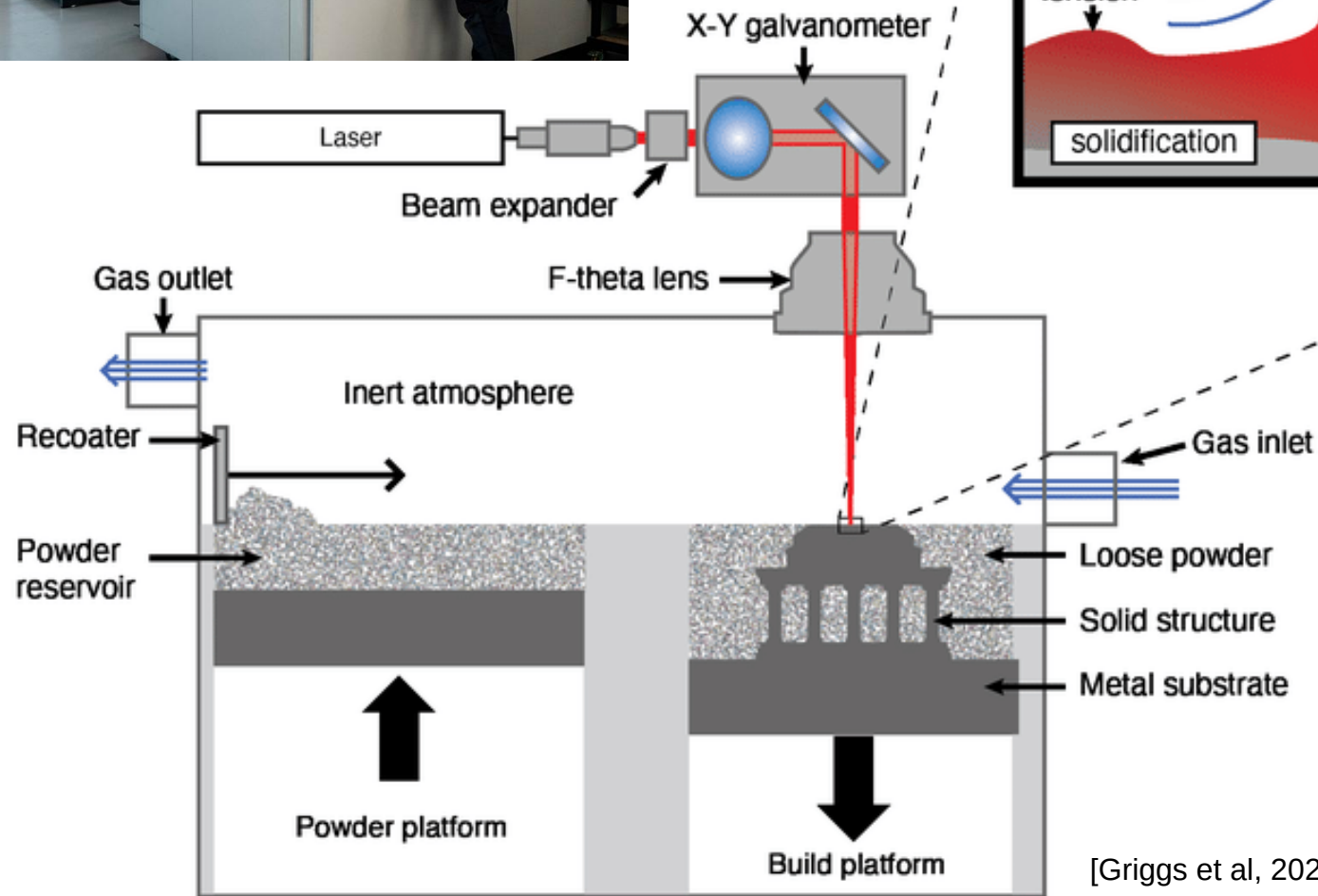
- 2 familles de PBF métallique
 - Fusion LASER sur lit de poudre
 - Fusion par FAISCEAUX d'ELECTRONS sur lit de poudre

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

Fusion LASER 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)



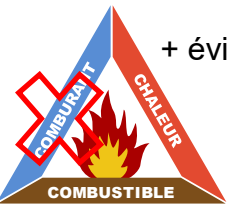
- Principe

Jusqu'à la dernière couche

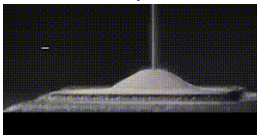
Remplir l'enceinte de gaz inerte
(argon ou azote)

→ Pièce brute finie

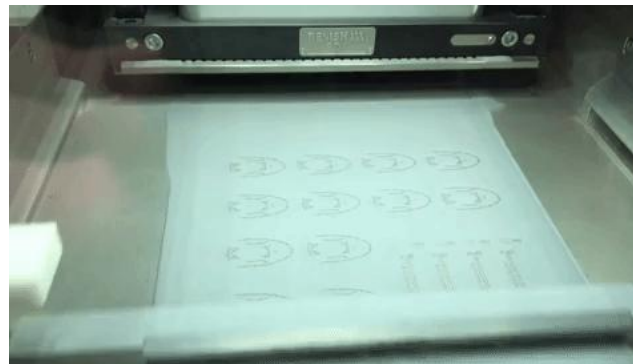
+ éviter l'oxydation



Billes de métal de ϕ 20 μ m en moyenne

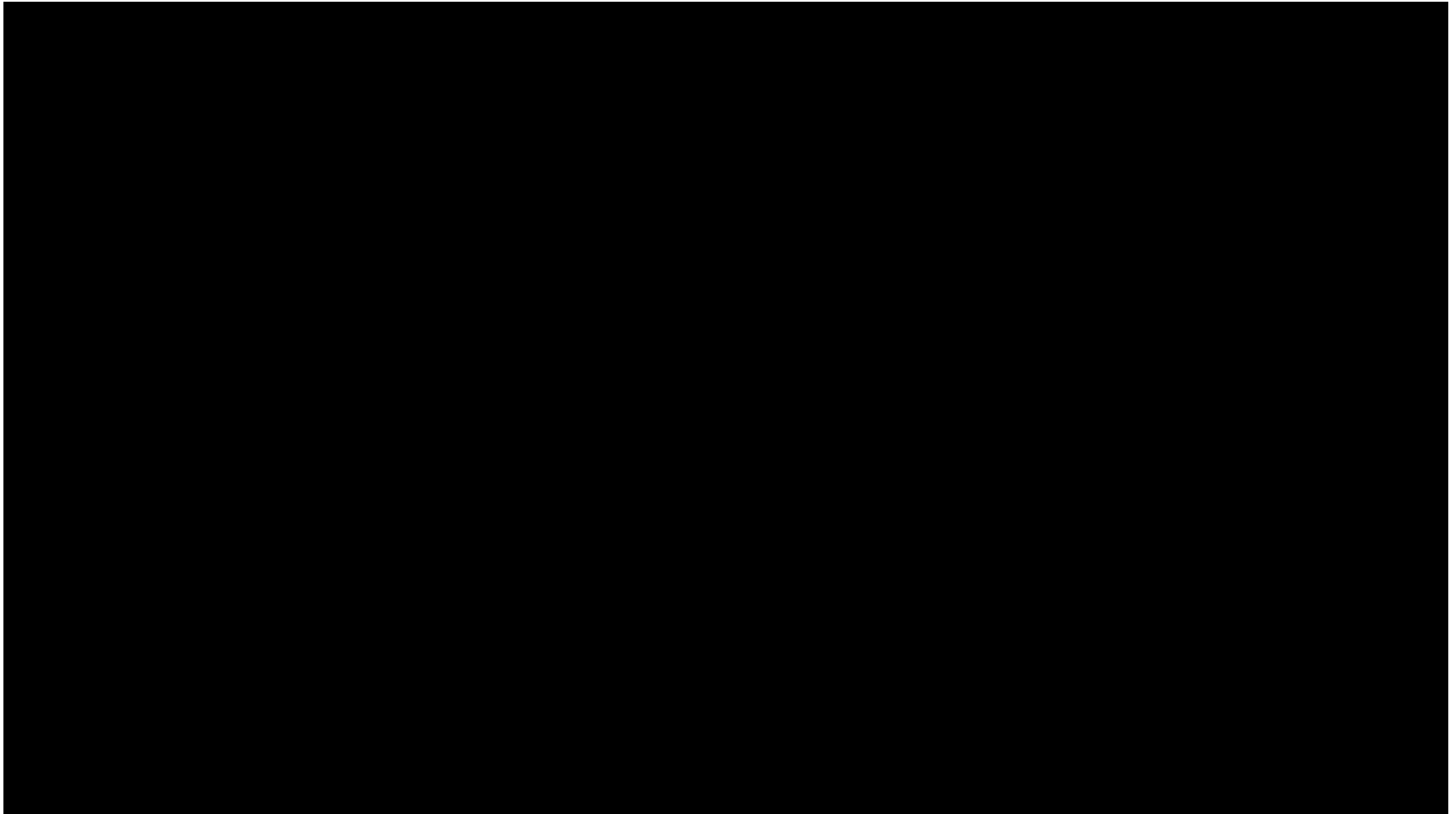


Epaisseur courante de couche : 30 μ m



Fusion LASER sur lit de poudre

Laser Powder Bed Fusion L-PBF



Fusion LASER sur lit de poudre

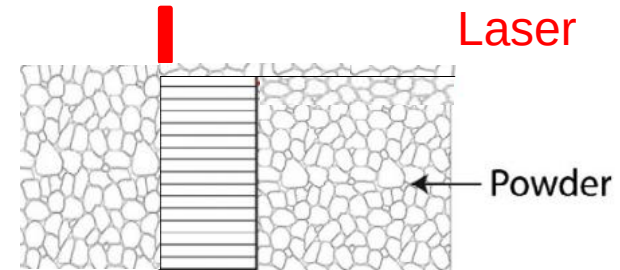
Laser Powder Bed Fusion L-PBF

- Problématiques de la technologie

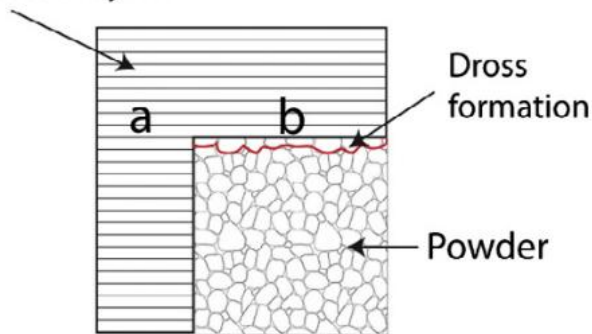
- Les scories (Dross):

- 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



Fabricated layers



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

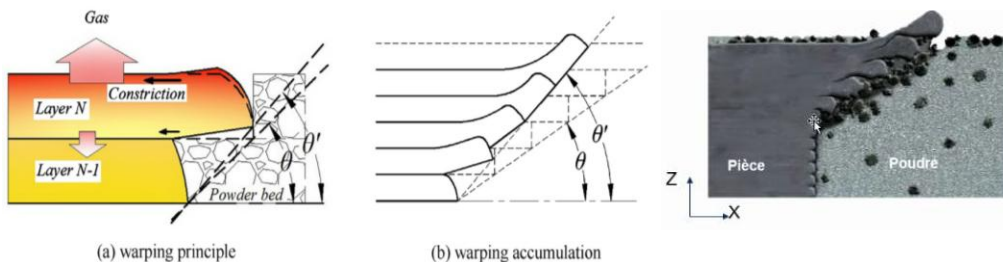


Scorie lors d'impression de porte à faux
(Imprimé sous L-PBF par MAQ-3D)

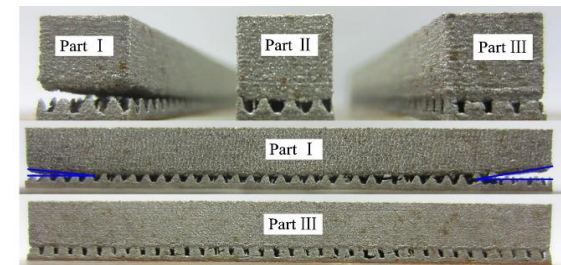
Fusion LASER sur lit de poudre

Laser Powder Bed Fusion L-PBF

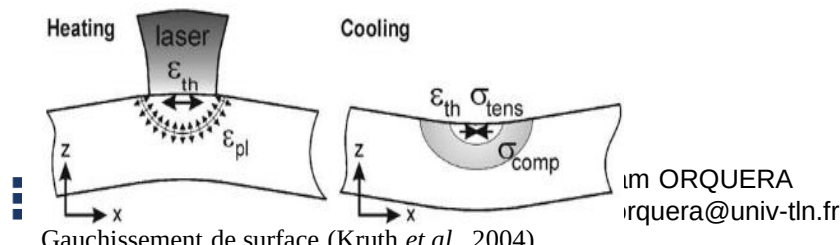
- Problématiques de la technologie
 - Gauchissement (Warping) :
 - La poudre fait office d'isolant thermique
 - retrait de la matière lors du refroidissement de la pièce
 - Les couches en porte à faux refroidiront en dernier lieu ainsi que la dernière couche
- => Cela crée des contraintes résiduelles,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



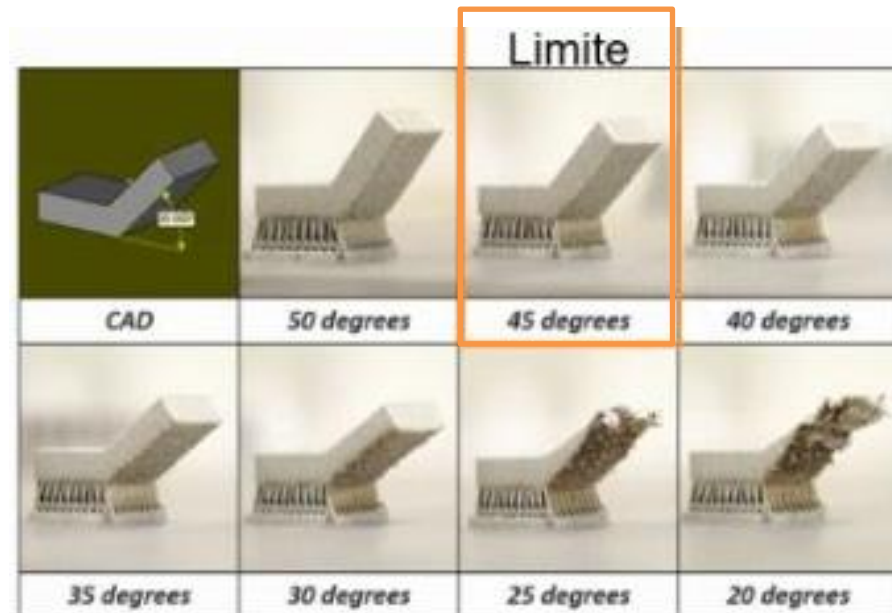
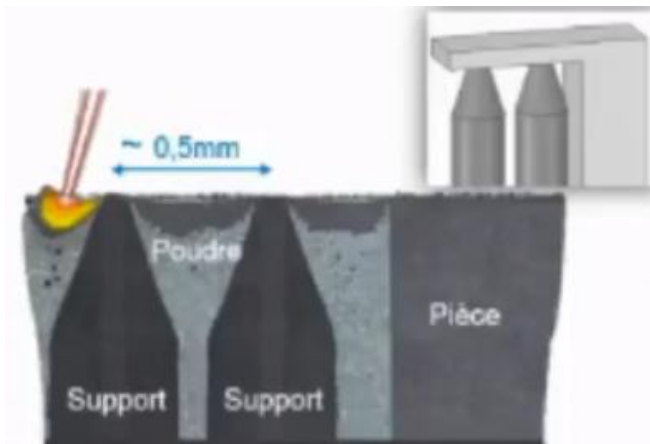
Gauchissement de surface (Kruth *et al.*, 2004)

im ORQUERA
rquera@univ-tln.fr

Fusion LASER sur lit de poudre

Laser Powder Bed Fusion L-PBF

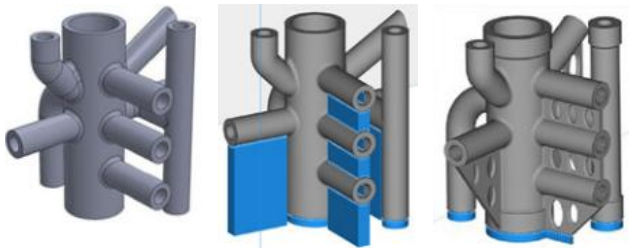
- Solutions pour éviter les scories
 - La surface de porte à faux ne doit pas excéder 0,5mm
 - L'angle maximal par rapport au plateau de production est de 45°



Fusion LASER sur lit de poudre

Laser Powder Bed Fusion L-PBF

- 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

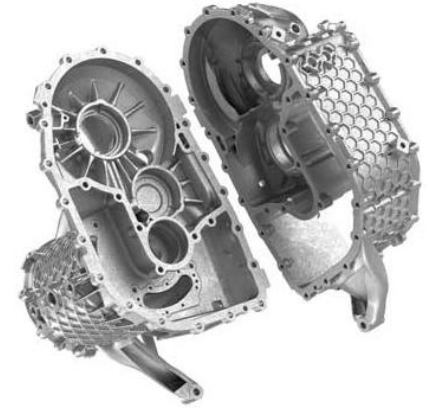
Fusion LASER sur lit de poudre

Laser Powder Bed Fusion L-PBF

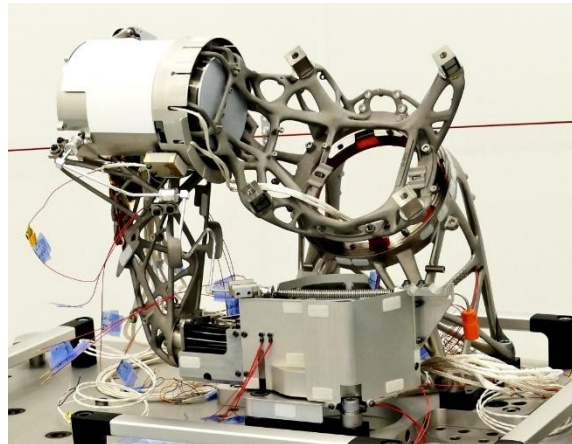
- Exemples d'applications



Etrier de frein en titane, 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)

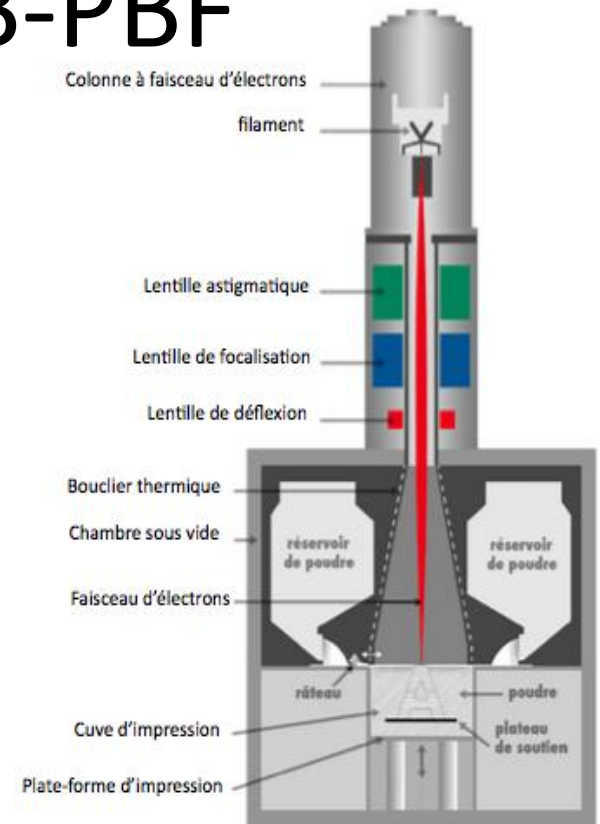
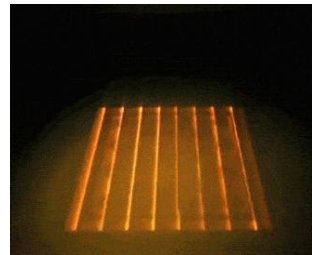
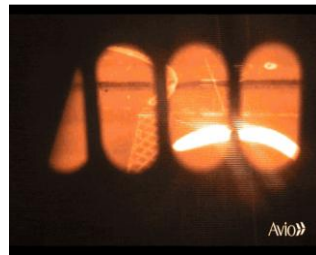
- 2 familles de PBF métallique
 - Fusion LASER sur lit de poudre
 - Fusion par FAISCEAUX d'ELECTRONS sur lit de poudre

Fusion par FAISCEAU d'ELECTRONS

Electron beam EB-PBF

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

- Principe



Jusqu'à la dernière couche

Mise sous vide
de l'enceinte

Pompe à vide
1 à 4mb



REPMO 3D

Fabrication Additive Métal

Fusion par FAISCEAU d'ELECTRONS

Electron beam EB-PBF

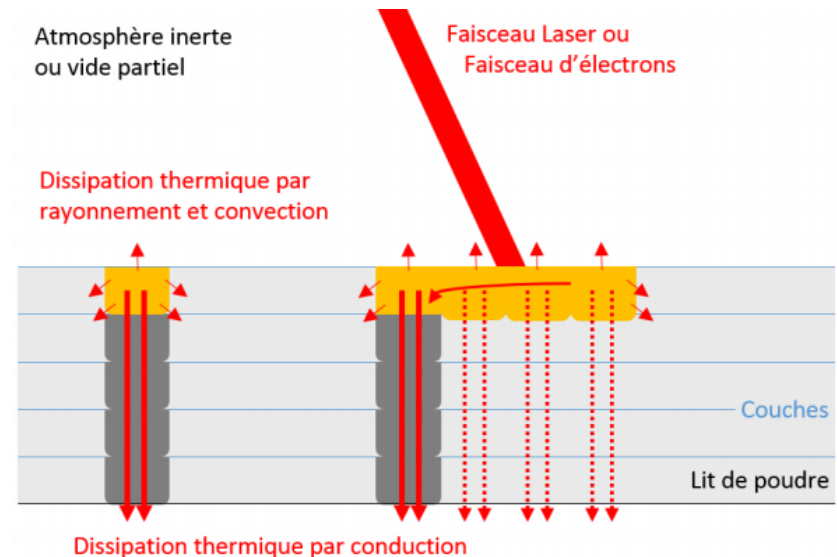


Fusion par FAISCEAU d'ELECTRONS

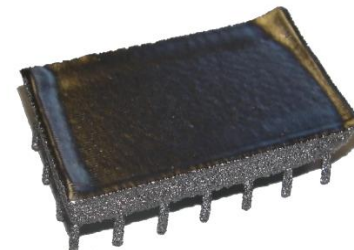
Electron beam EB-PBF

- Problématiques de la technologie
 - Poudre autoportante et compactée 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 L-PBF par rapport à l'EB-PBF
 - 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'EB-PBF par rapport au L-PBF
 - 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

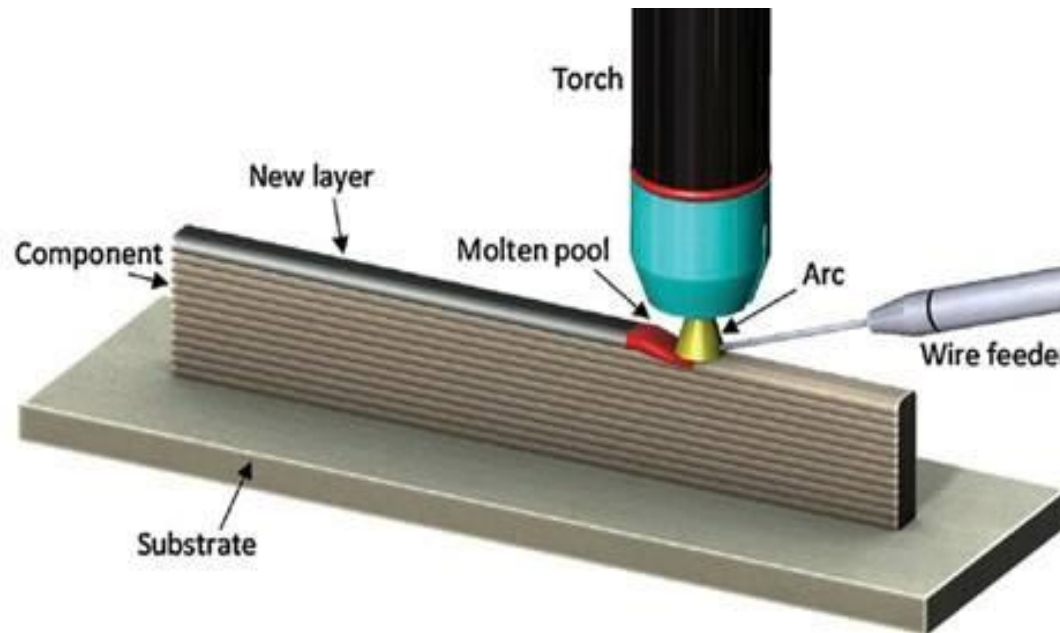
Dépôt de matière sous énergie concentrée

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)

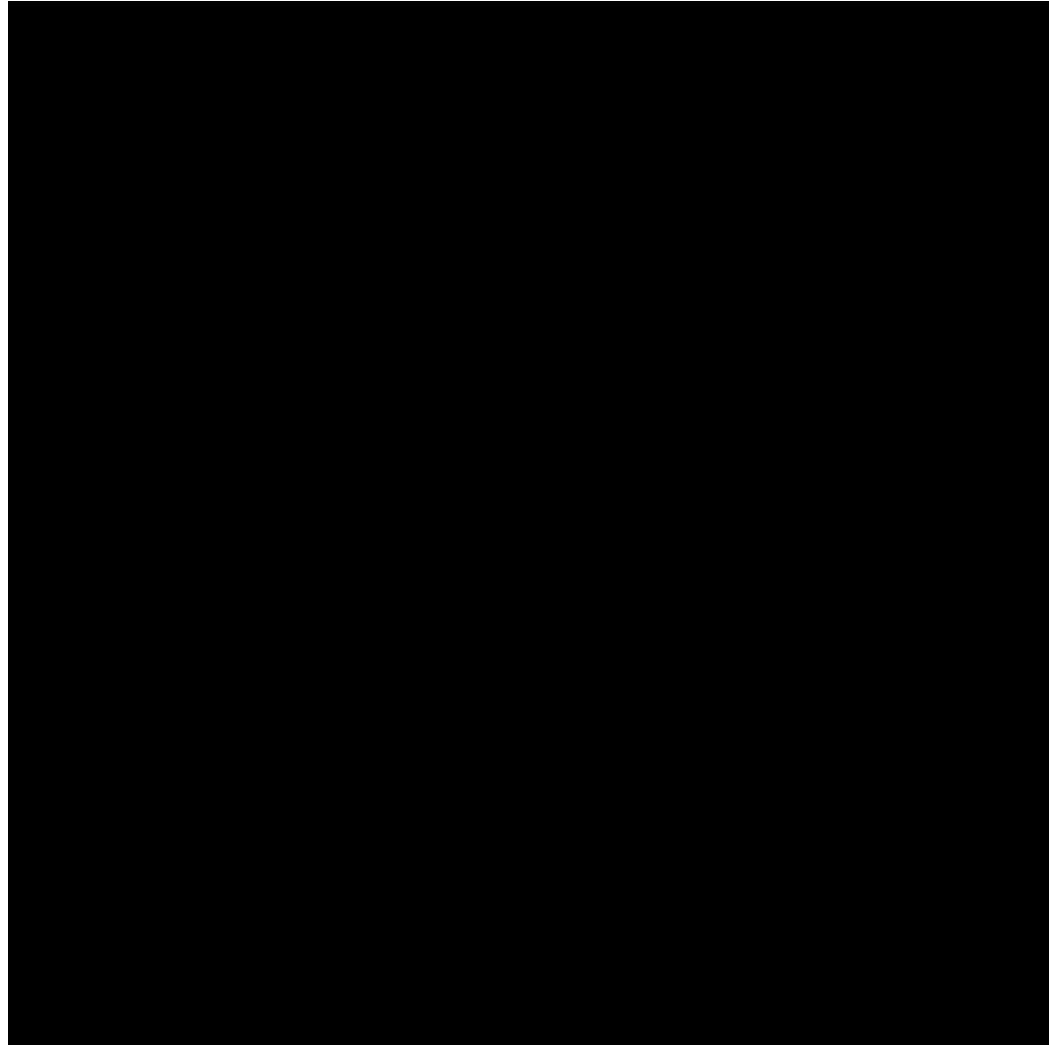
Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)

- 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)

- 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]

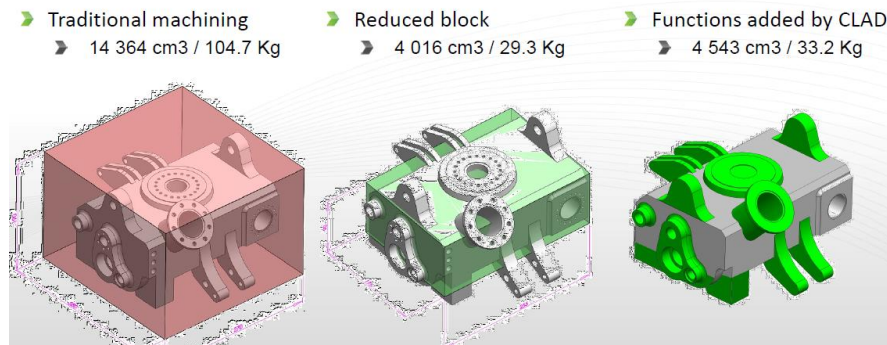


Cadre de vélo, www.erm-fabtest.com

Dépôt de matière sous énergie concentrée

Direct Energy Deposition (DED)

- 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 »



Rajout de fonctions sur un bloc métallique (Frechard 2015)

Dépôt de matière sous énergie concentrée

Direct Energy Deposition (DED)

- Quelques avantages et inconvénients
 - Qualité de l'état de surface médiocre
 - Temps de fabrication long
 - Forme des pièces peu complexe
 - Surfaces auto-portantes
 - Pb de warping

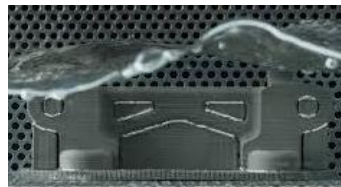


Extrusion de matière de type BMD

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)



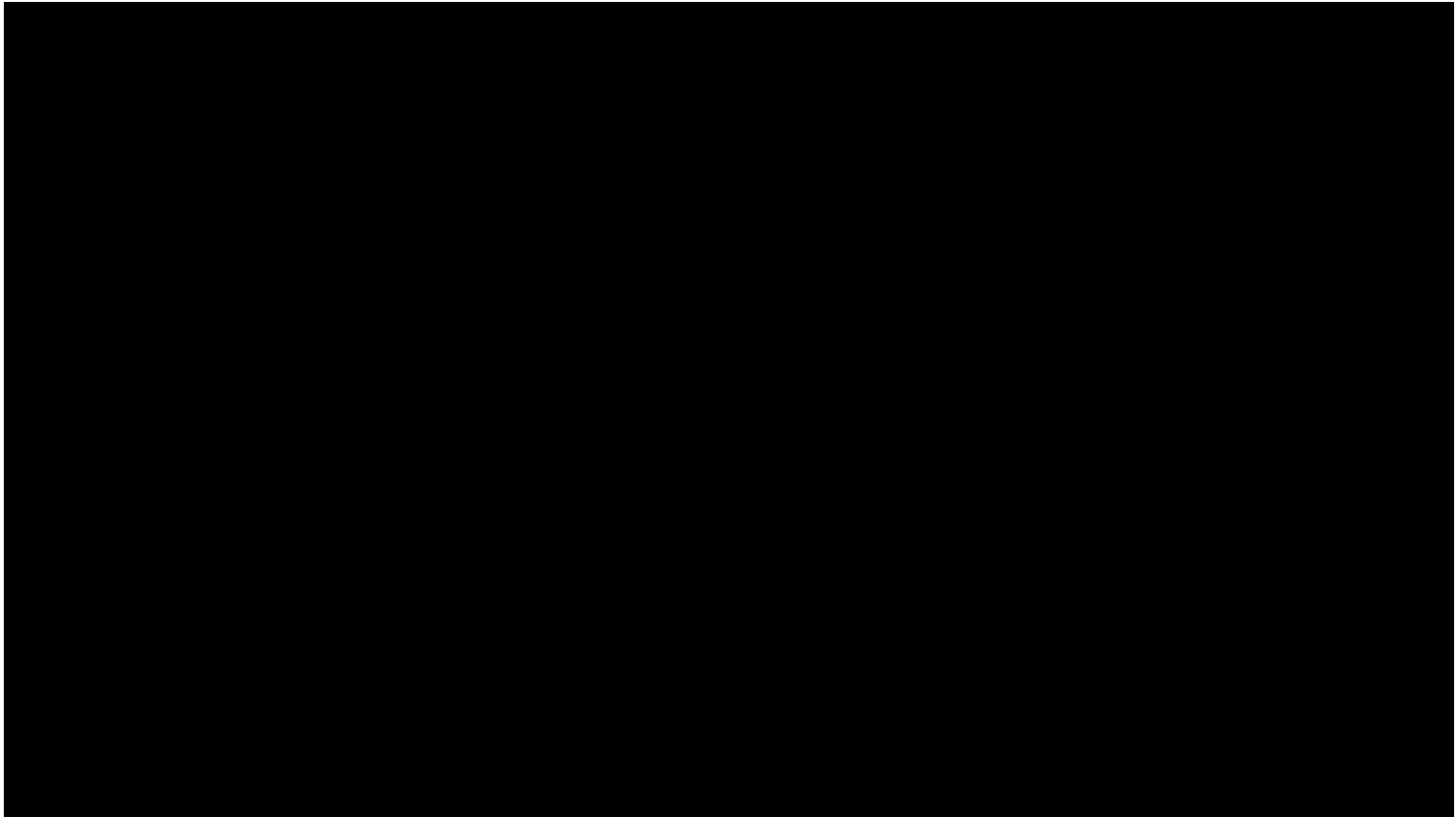
Jusqu'à la dernière couche

Impression de la
pièce verte

→ Pièce
brute
finie

Extrusion de matière de type BMD Bound Metal Deposition

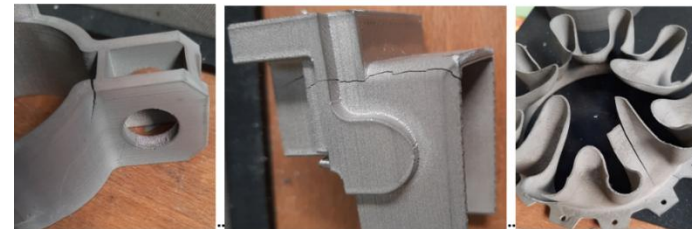
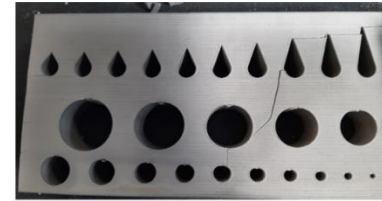
- Principe



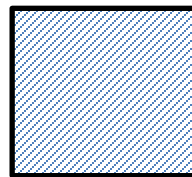
Extrusion de matière de type BMD

Bound Metal Deposition

- Problématique de la BMD
 - Lors de la phase de frittage le retrait matière peut provoquer des amorces de fissures



- Pour la phase de déliantage les parois doivent être au maximum épaisse de 5mm



Pièce massive
dessinée en BE



Pièce réalisée par la
machine BMD

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
 - + Coût 3 fois moins élevé qu'un L-PBF
 - Lors de post-traitement le retrait des surfaces crée une déformation (stade peu maîtrisé actuellement)
 - Épaisseur de la peau de 3mm (conseillée) pour permettre au liant d'être évacué, ainsi, l'intérieur des pièces est obligatoirement en treillis.

PROJECTION DE LIANT METALLIQUE

Metal Binder Jetting (MBJ)

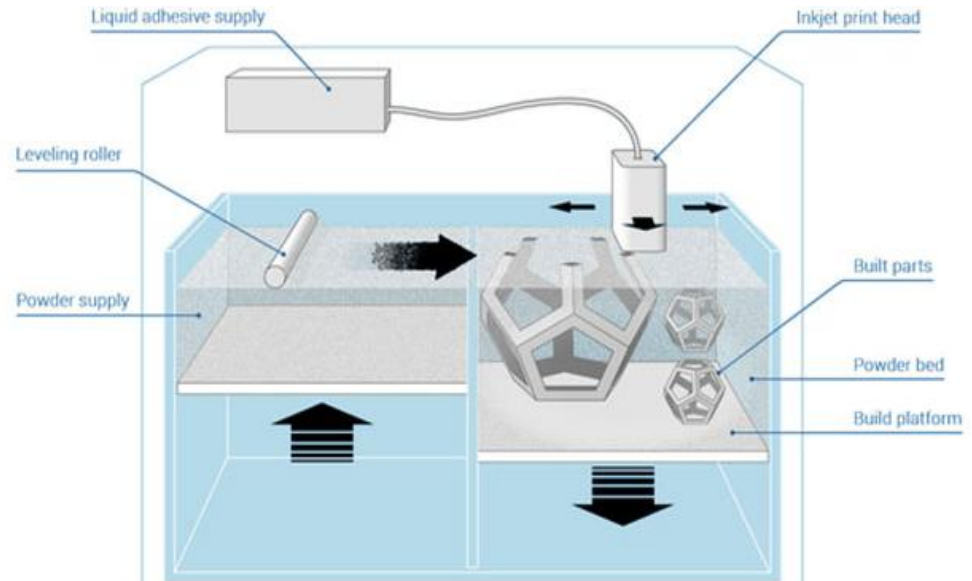
- Appellations

- MBJ
- MBJT

- Principe

Jusqu'à la dernière couche

Impression de la
pièce verte



→ Pièce
brute
finie



PROJECTION DE LIANT METALLIQUE

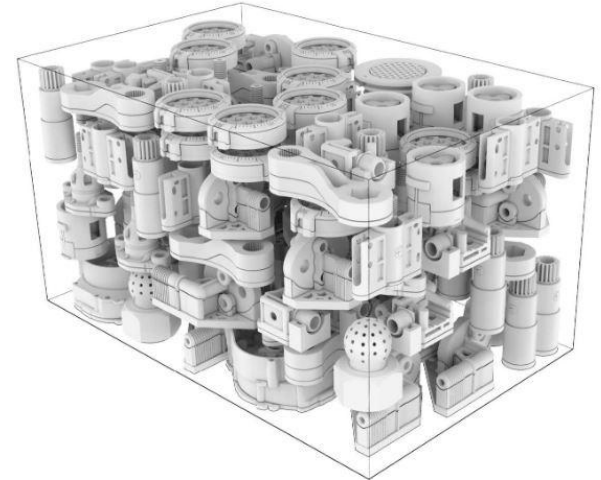
Metal Binder Jetting (MBJ)

- Principe

PROJECTION DE LIANT METALLIQUE

Metal Binder Jetting (MBJ)

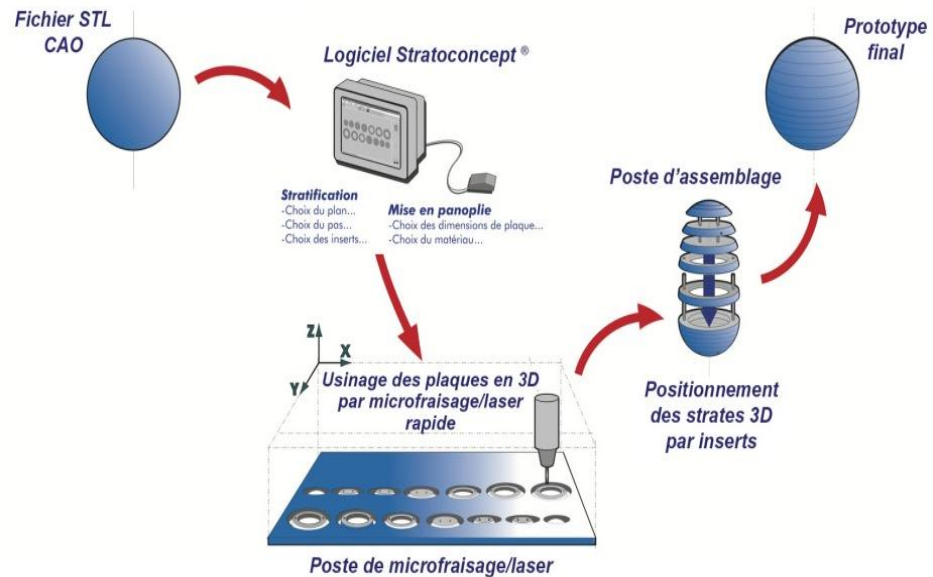
- Exemple d'application
- Avantage / inconvénient
 - + Grande productivité
 - + Pas besoin de support
 - + Grande finition
 - Lors du frittage le retrait des surfaces crée une déformation entre 20 à 40%
 - Dimensions des pièces faibles



STRATIFICATION DE COUCHES

Laminated Object Manufacturing (LOM)

- Appellations
 - SHL sheet lamination
 - LOM Laminated Object
- Principe



STRATIFICATION DE COUCHES

Laminated Object Manufacturing (LOM)

- Principe



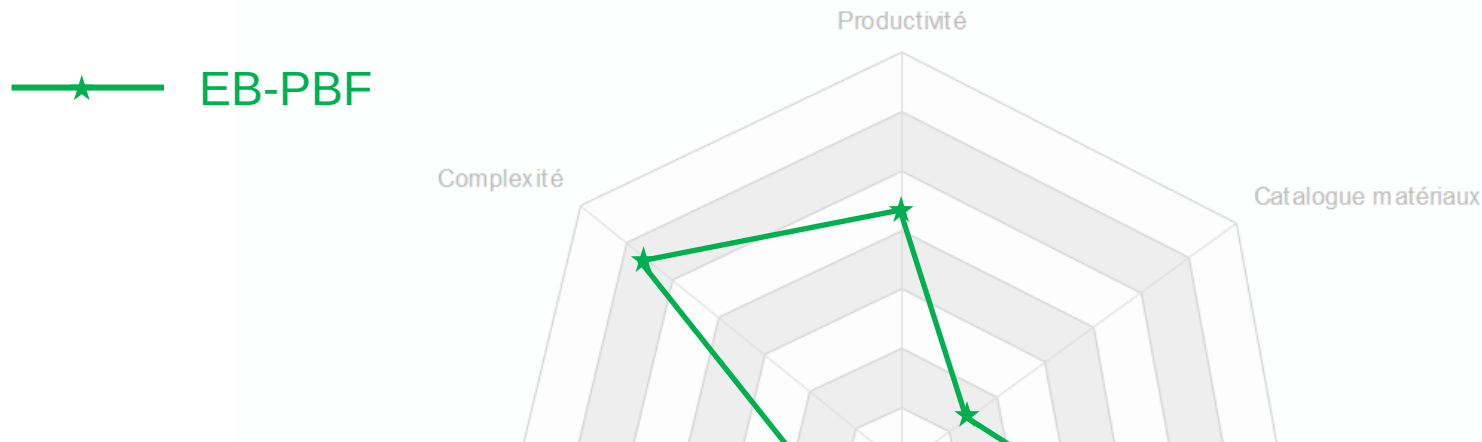
STRATIFICATION DE COUCHES

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



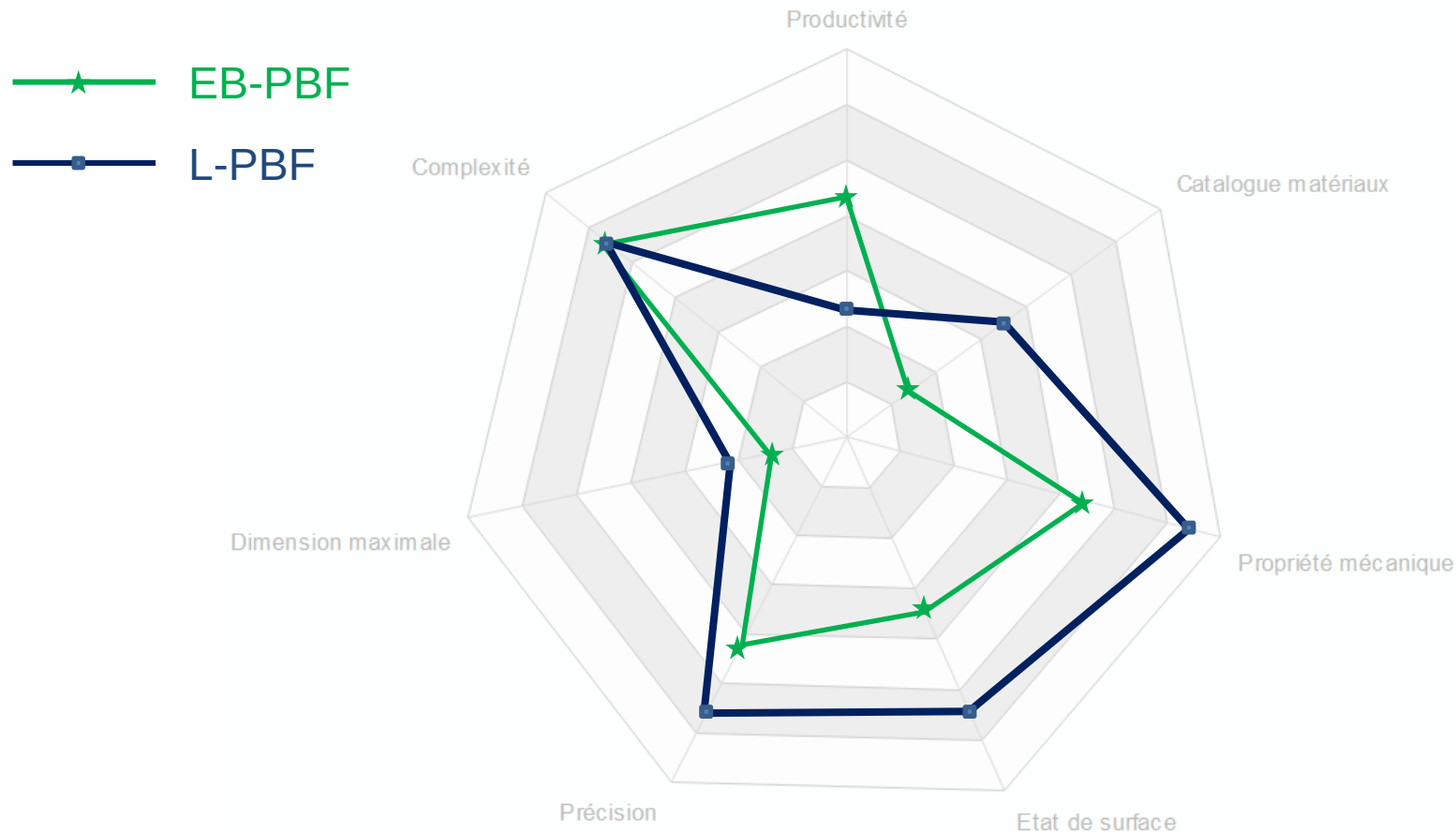
COMPARAISON ENTRE PROCÉDES ADDITIFS METALLIQUES



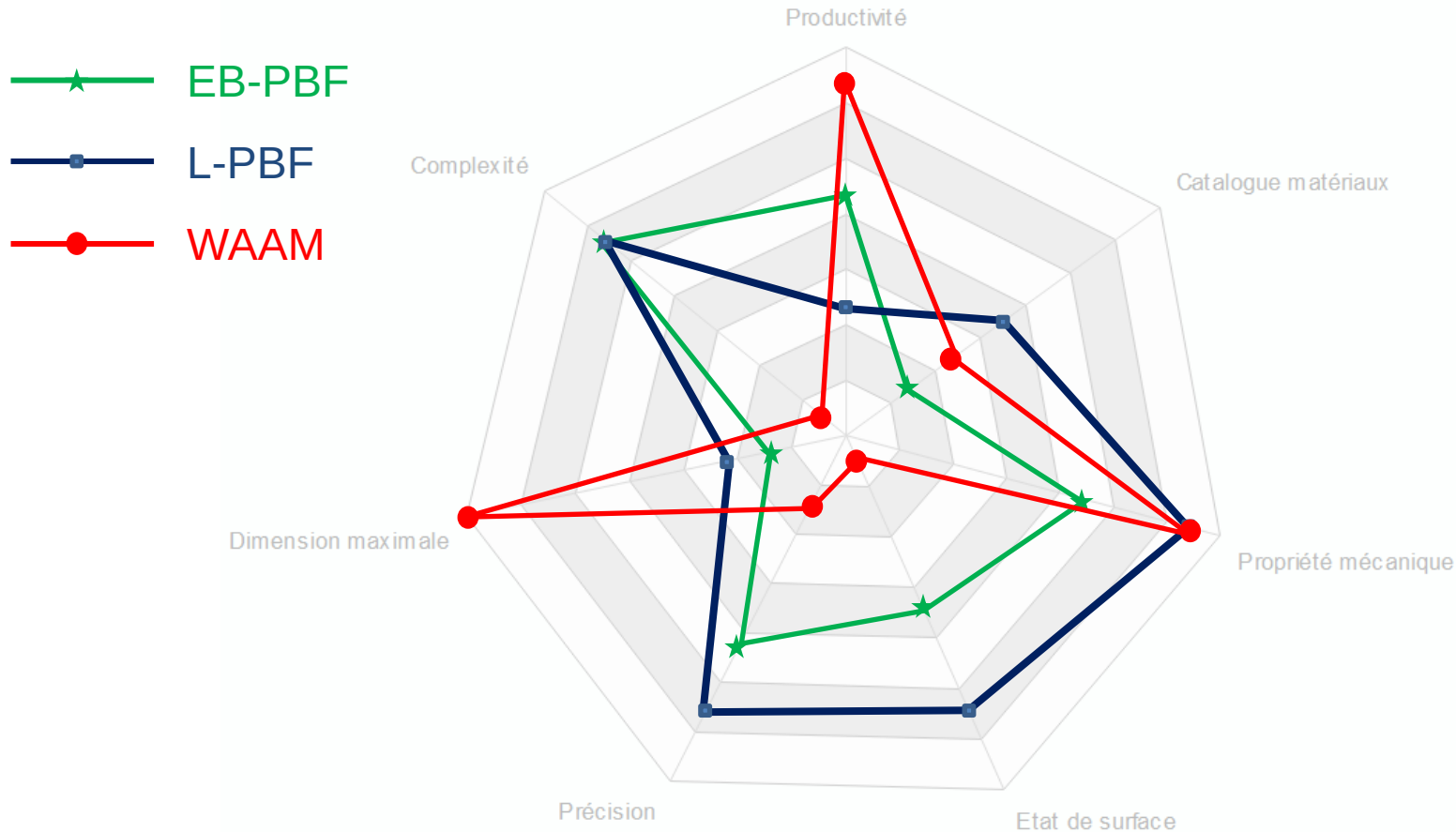
La productivité :

Elle désigne la quantité de produit qu'une entreprise peut fabriquer au cours d'une période donnée, de l'approvisionnement en matières premières à la livraison du produit fini

COMPARAISON ENTRE PROCÉDES ADDITIFS METALLIQUES



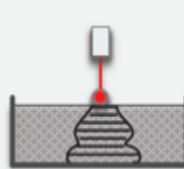
COMPARAISON ENTRE PROCÉDES ADDITIFS METALLIQUES



LES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS

- Il existe 7 procédés de FA référencés par la norme

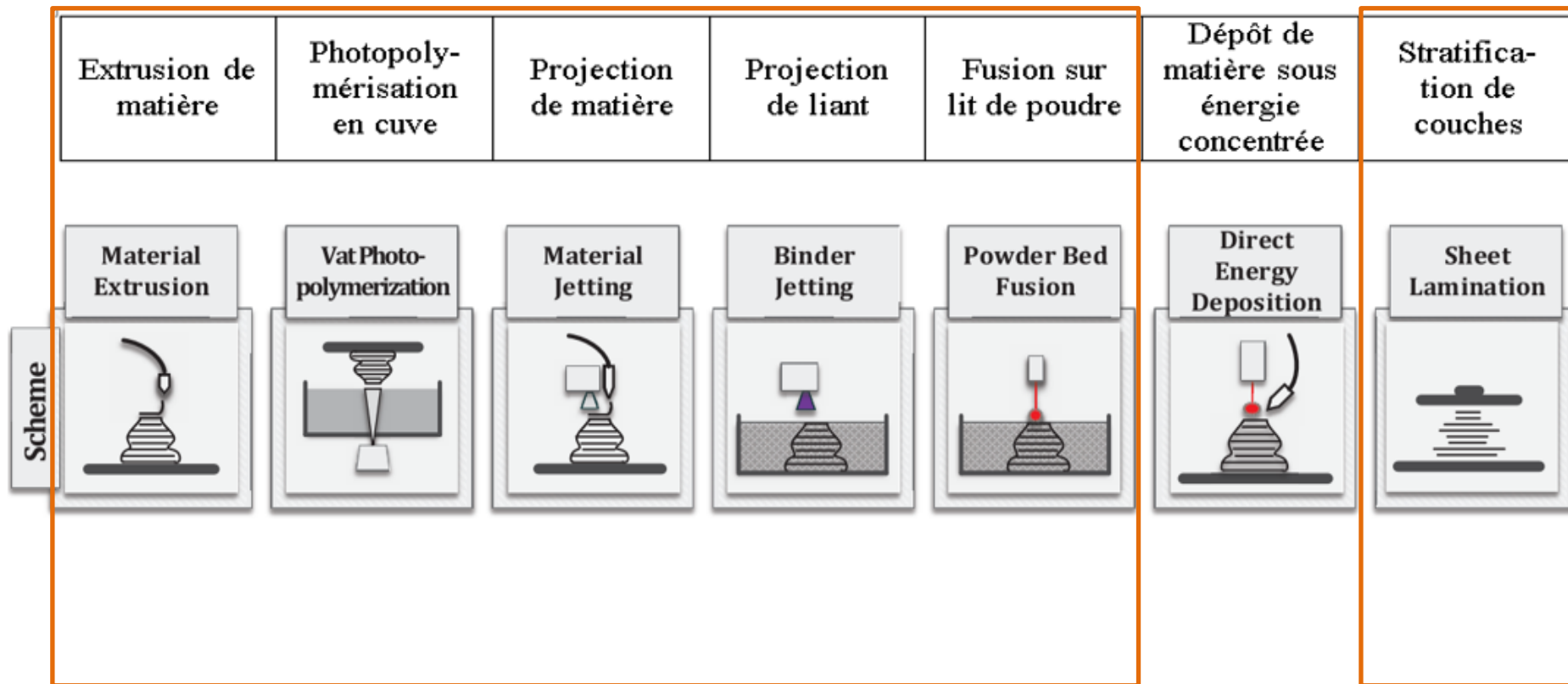
FA Métallique

Scheme	Extrusion de matière	Photopolymérisation en cuve	Projection de matière	Projection de liant	Fusion sur lit de poudre	Dépôt de matière sous énergie concentrée	Stratification de couches
	Material Extrusion 	Vat Photopolymerization 	Material Jetting 	Binder Jetting 	Powder Bed Fusion 	Direct Energy Deposition 	Sheet Lamination 

.../...

LA FA POLYMÈRE et autre

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



.../...

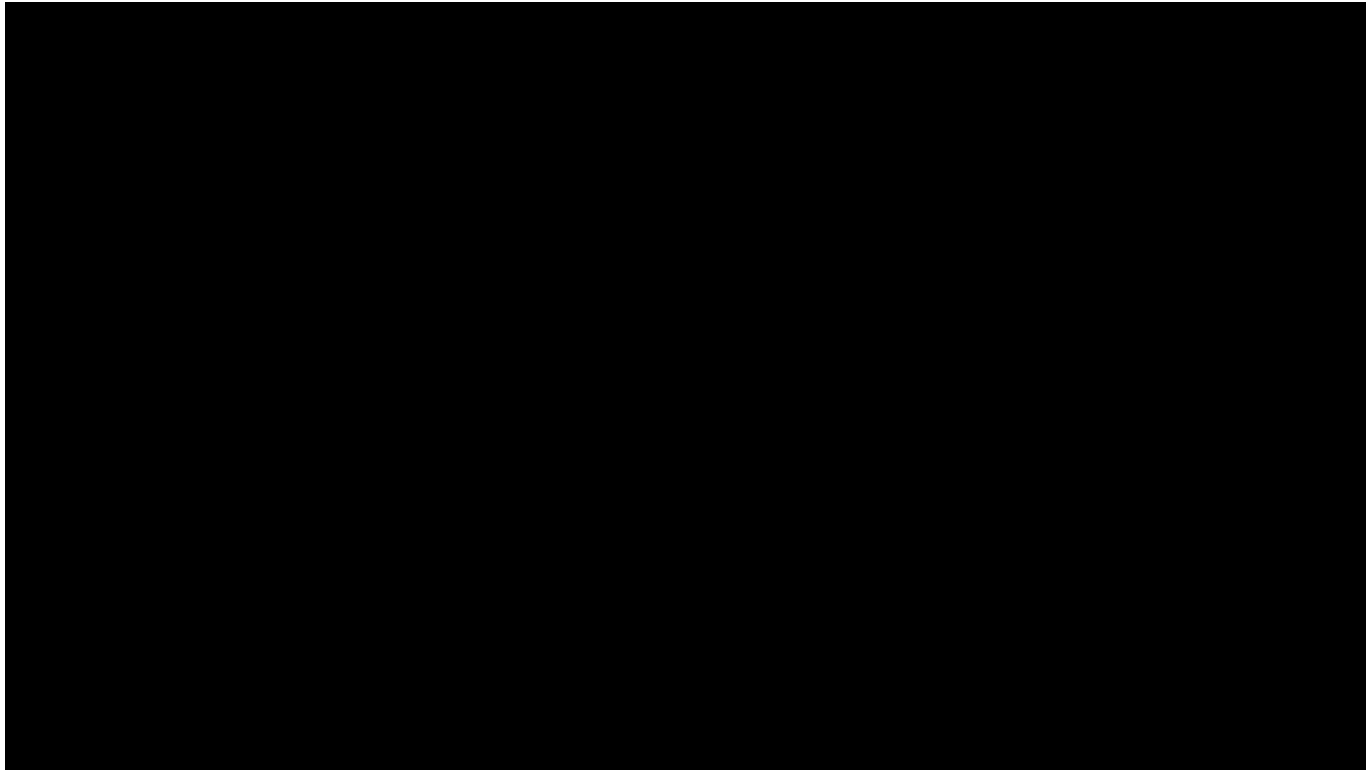
Fusion sur lit de poudre

Selective Laser Sintering SLS

- Appellations
 - FSL Frittage Sélectif par Laser
 - **SLS** Selective Laser Sintering
- Principe
 - identique au L-PBF,
 - la différence est qu'il y a frittage de la poudre et non fusion
- Définitions
 - **Frittage** : On chauffe une poudre sans la mener jusqu'à la fusion. Sous l'effet de la chaleur, les grains se soudent entre eux, ce qui forme la cohésion de la pièce
 - **Fusion** : la fusion implique de passer d'un état solide à liquide grâce à une température élevée

Fusion sur lit de poudre

Selective Laser Sintering SLS



Fusion sur lit de poudre

Selective Laser Sintering SLS

- Exemple d'application



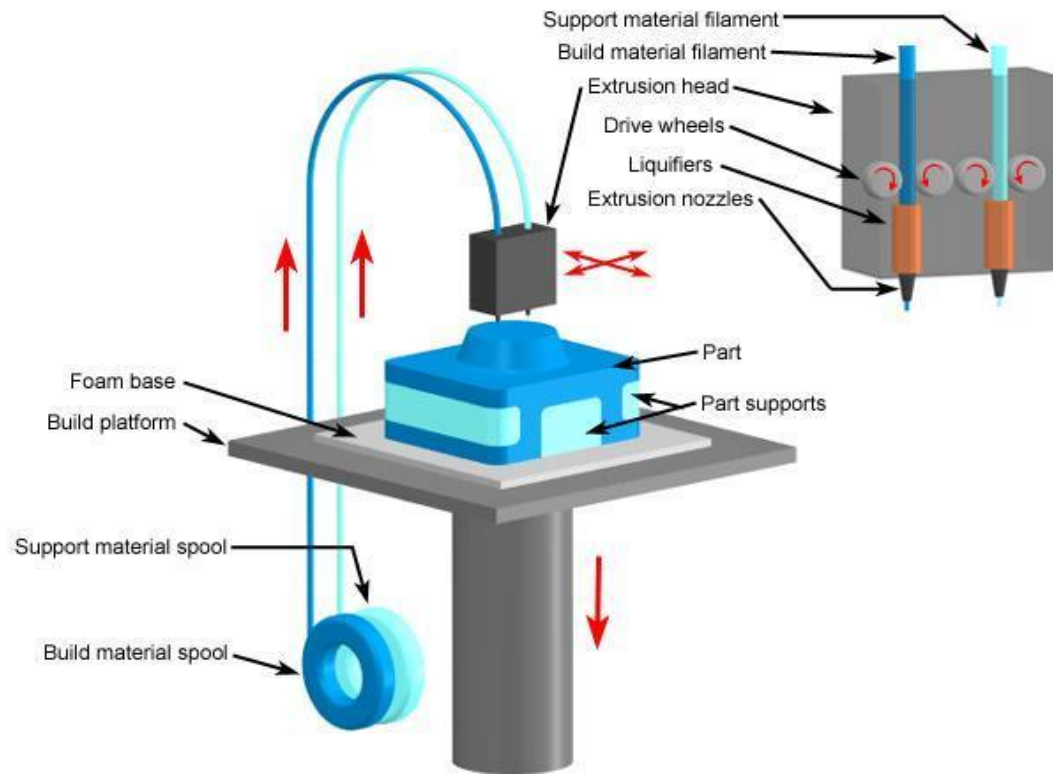
- Avantage/inconvénient
 - + Rapidité de fabrication
 - + Coût relativement faible
 - + Fabrication en série de petite taille
 - + Caractéristique mécanique proche de l'injection plastique
 - + Pas de support
 - Surface rugueuse
 - Retrait de 3% en phase de refroidissement

Extrusion de matière

Fused Deposition Modelling FdM

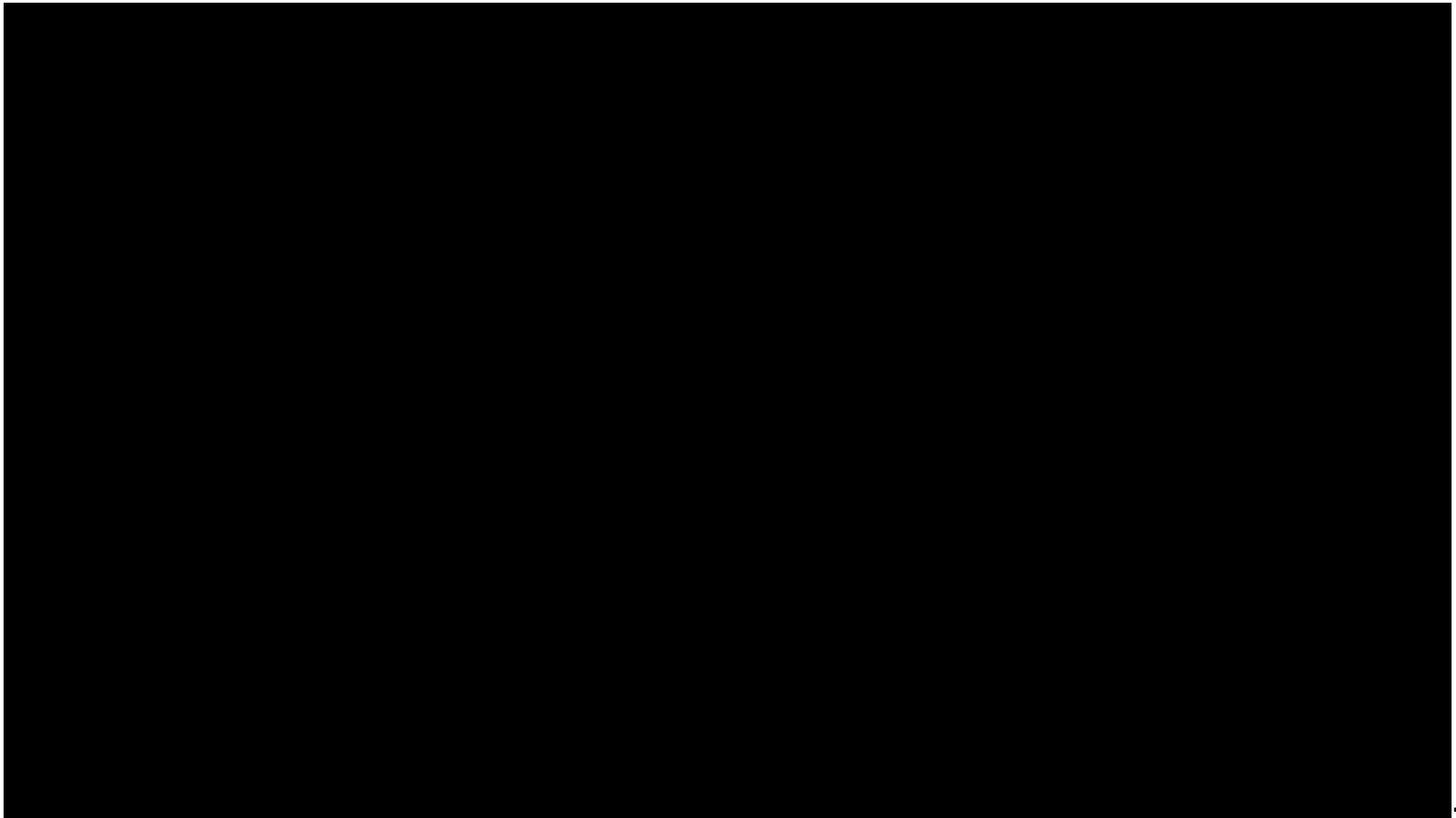
- Appellations
 - **FdM** Fused Deposition Modelling
 - MEX Material Extrusion
 - FFF Free Form Fabrication
 - 3D printing

- Principe



Extrusion de matière

Fused Deposition Modelling FdM



Extrusion de matière

Fused Deposition Modelling FdM

- Problématiques de la technologie

(Lefebvre 2015)

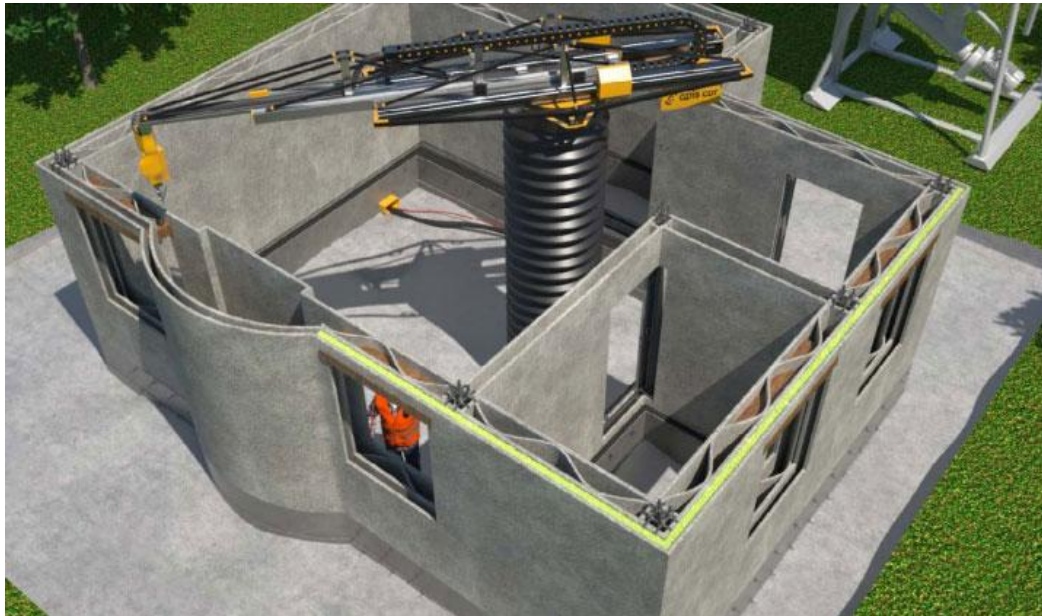
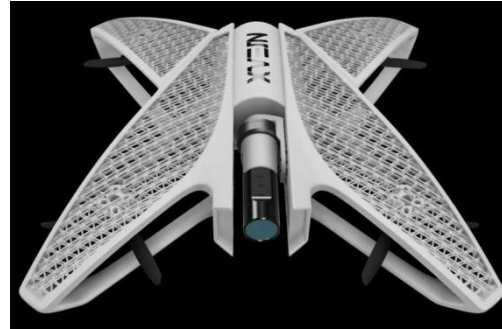


- Nécessité de support à partir d'un certain porte à faux
- Enlèvement à la main et/ou dans un bain de produit diluant
- Gauchissement des pièces lors du refroidissement
- Matériaux
 - Plastique ; Nylon
 - Bois; métal; béton; nourriture...

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

Exemples d'application



Projection de liant

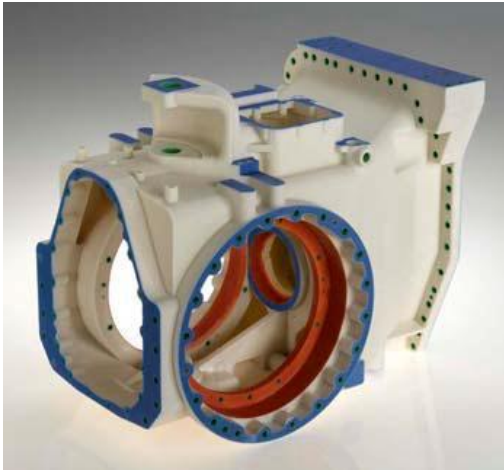
- Appellations
 - **BJ** Binder Jetting
 - BJT
- Principe
 - Identique au MBJ

Projection de liant

- Appellations
 - **BJ** Binder Jetting
 - BJT
- Principe
 - Identique au MBJ
- Avantages/inconvénients
 - + Grande productivité
 - + pas de support
 - + Impression couleur
 - + possibilité de pièces souples

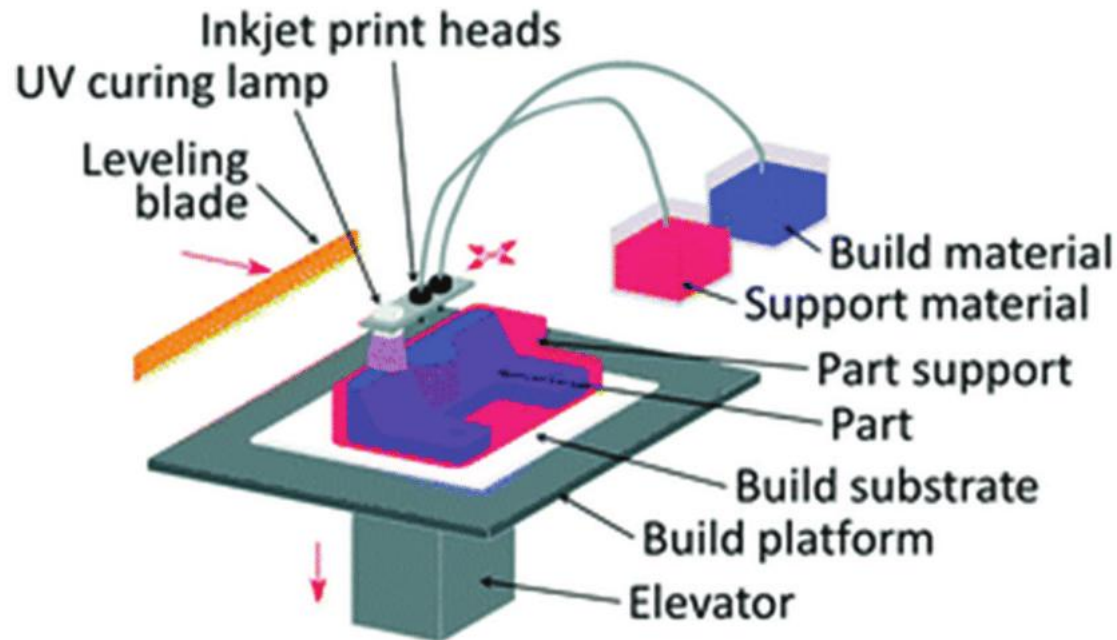
Exemples d'application

- **Projection de liant / Binder Jetting**



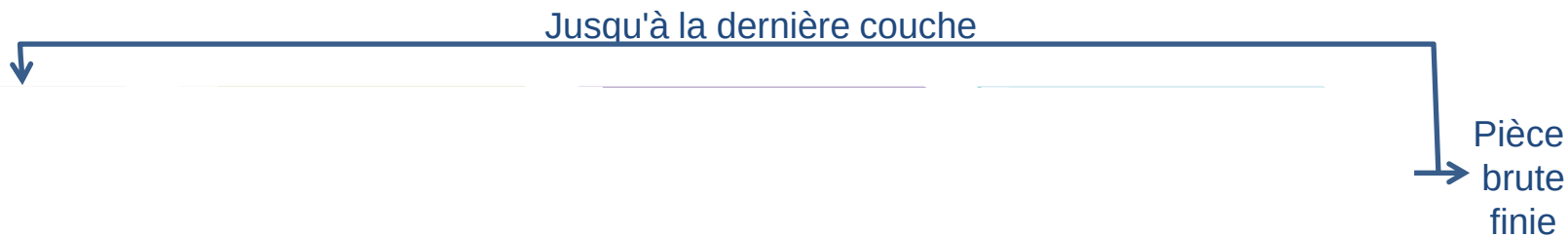
Projection de matière

- Appellations
 - PJ PolyJet
 - **MJM** Multi Jet Modeling
 - MJP Multi Jet Printing
- Principe

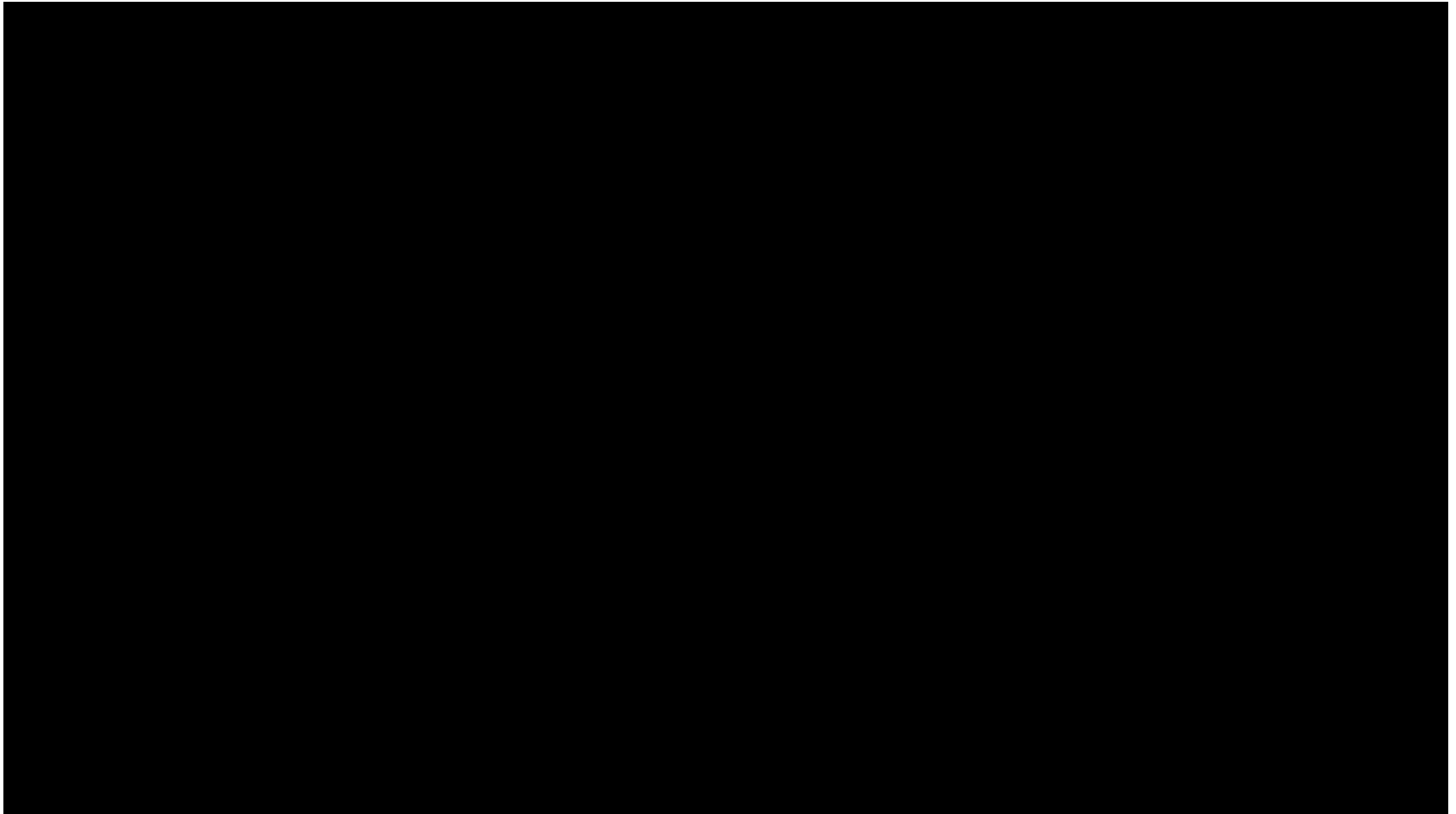


Projection de matière

- Appellations
 - PJ PolyJet
 - **MJM** Multi Jet Modeling
 - MJP Multi Jet Printing
- Principe



Projection de matière



Projection de matière

- Problématiques de la technologie
 - Support sur toutes les surfaces (sauf éventuellement celle du dessus)
 - 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

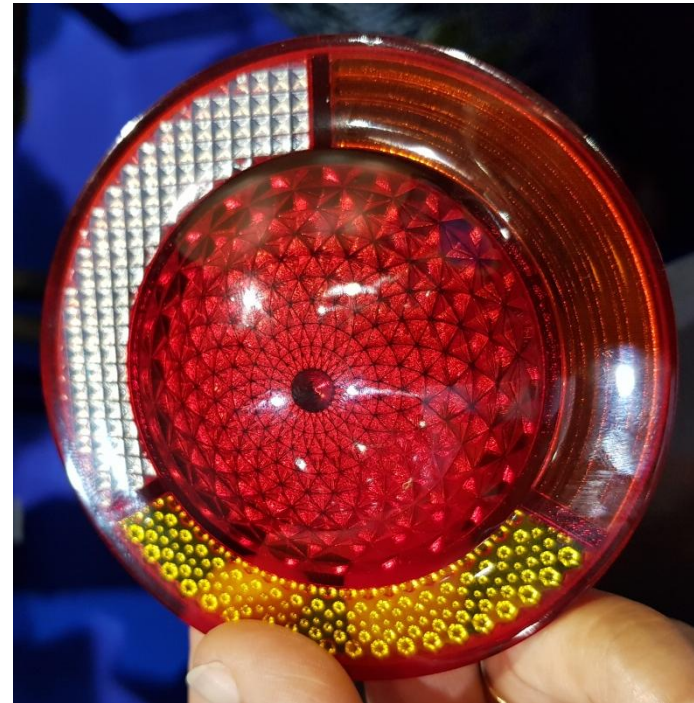


Avantages inconvénients

- + 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



STRATIFICATION DE COUCHES

Laminated Object Manufacturing (LOM)

- Appellations
 - SHL sheet lamination
 - LOM Laminated Object
- Principe

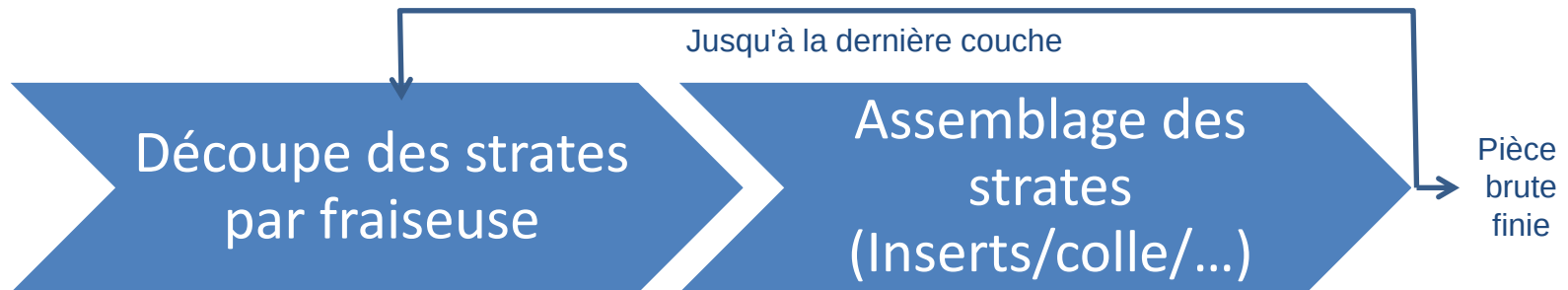
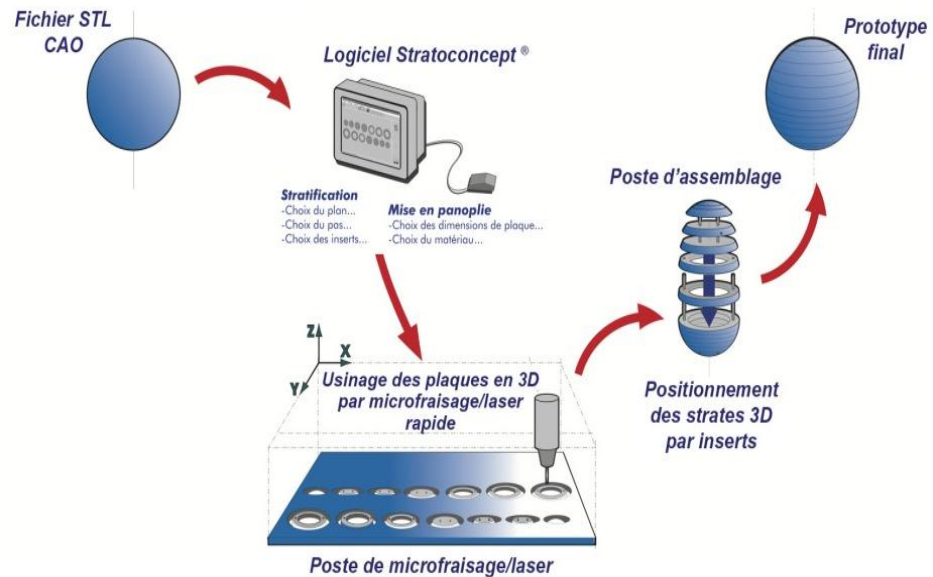
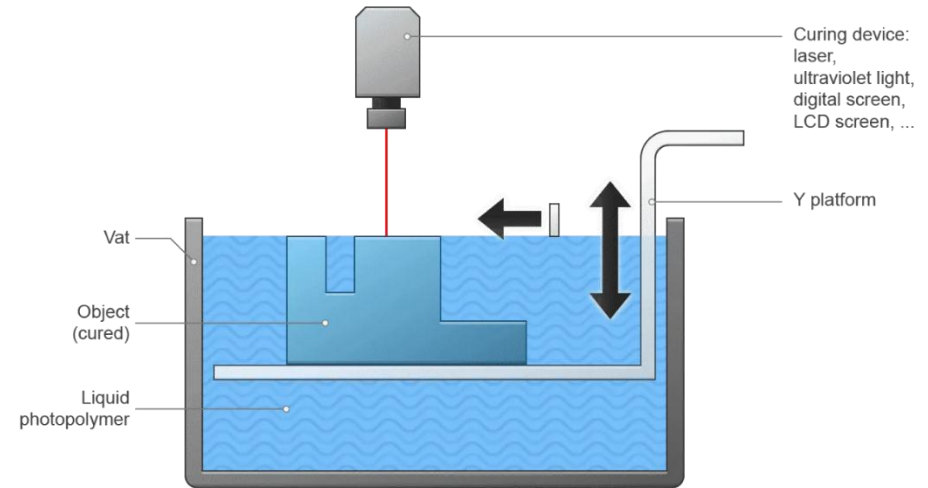


Photo polymérisation en cuve

Stéréolithographie SLA

- Appellations
 - VPP vat photopolymerization
 - **SLA** Stéréolithographie ou SL
 - VAT
 - DLP (Digital Light Processing)



2018 © Dassault Systèmes

- Principe

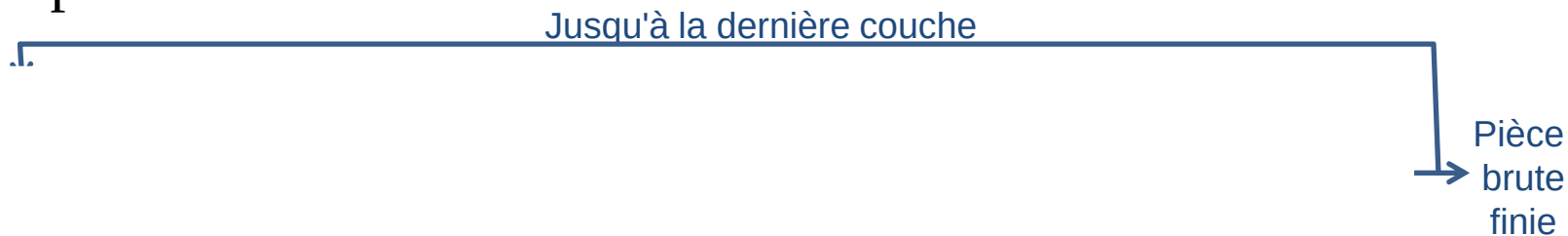


Photo polymérisation en cuve

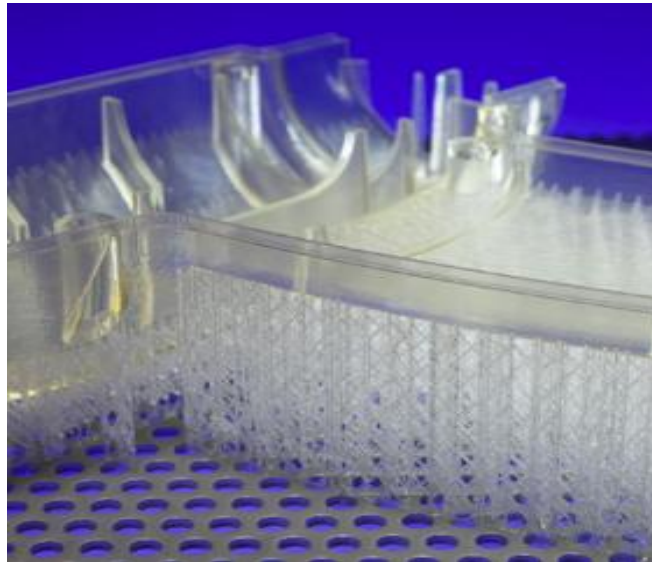
Stéréolithographie SLA

- Stéréolithographie, SLA



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

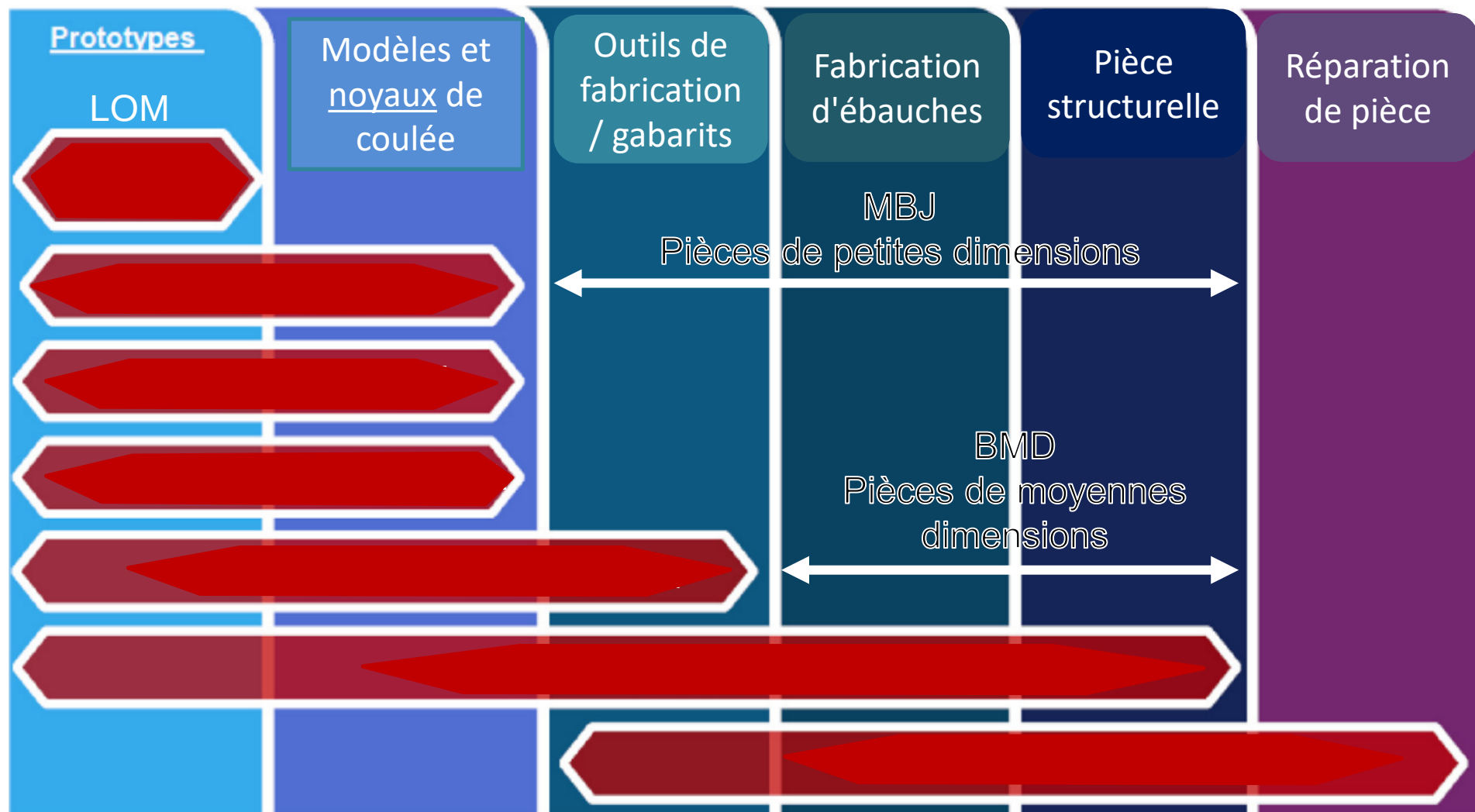
- + Rapide (surtout pour le DLP)
- + Précis
- + Possibilité de faire des moules
- + Translucidité
- + État de surface
- + Pièce de très grande dimension

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

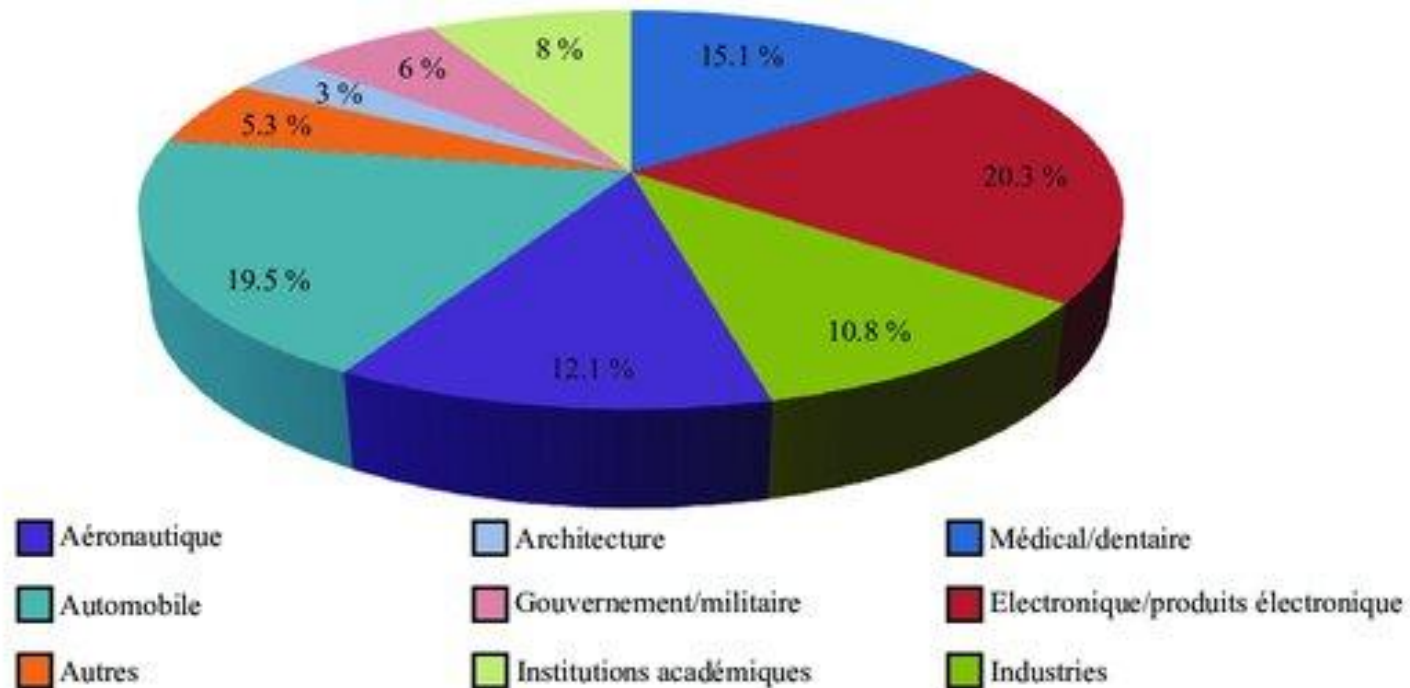
Exemples d'application





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

Les secteurs et domaines d'utilisation

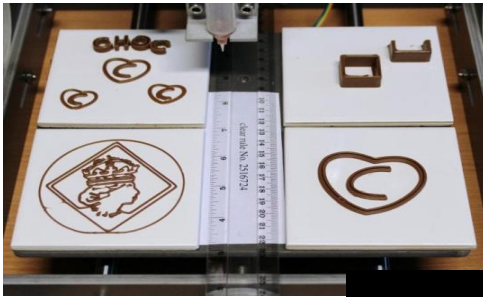


Les secteurs et domaines d'utilisation



.../...

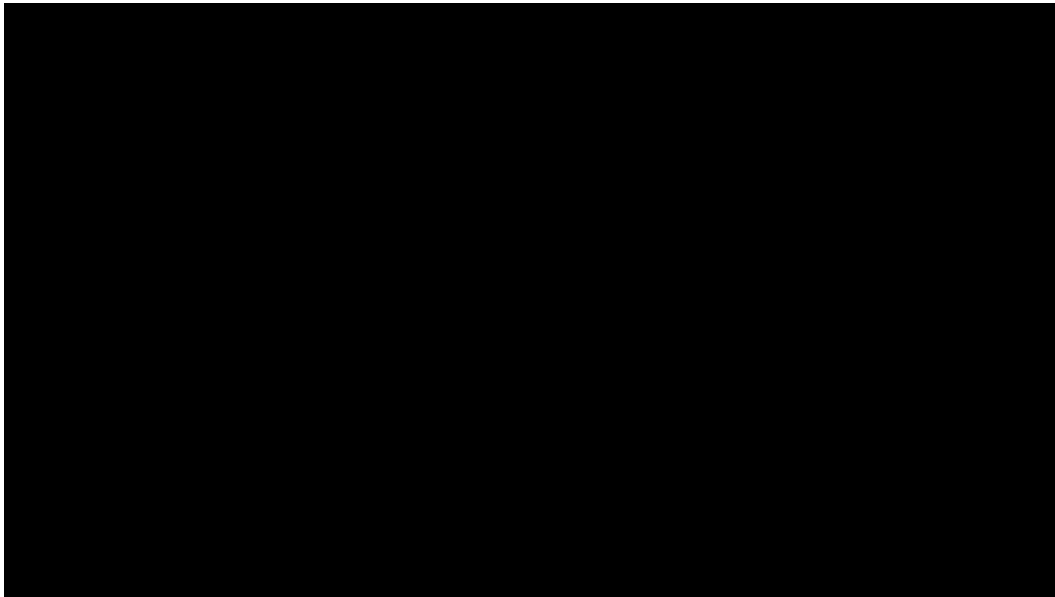
rs et domain



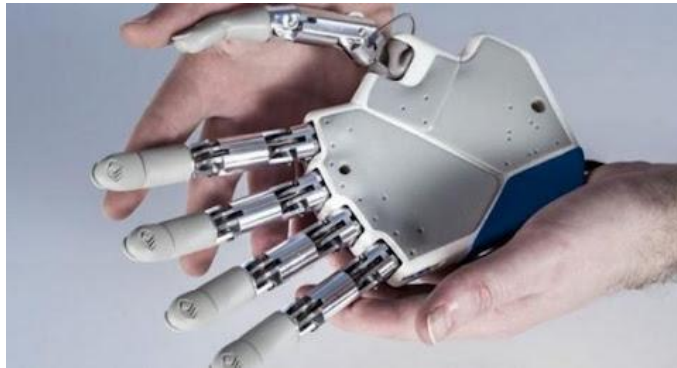
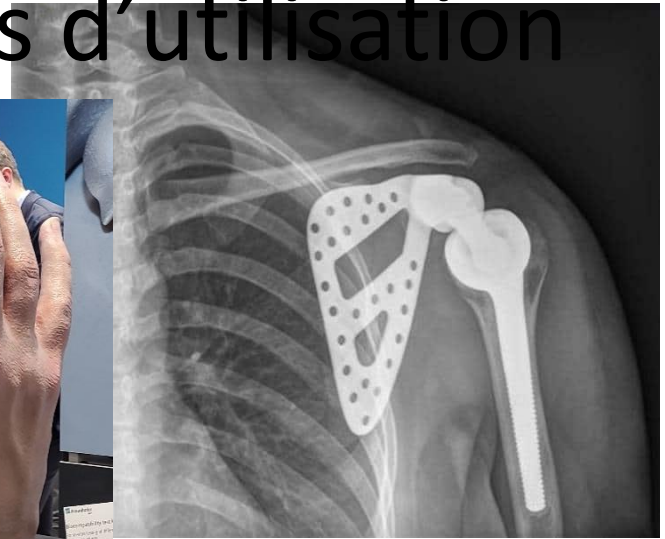
Les secteurs et domaines d'utilisation



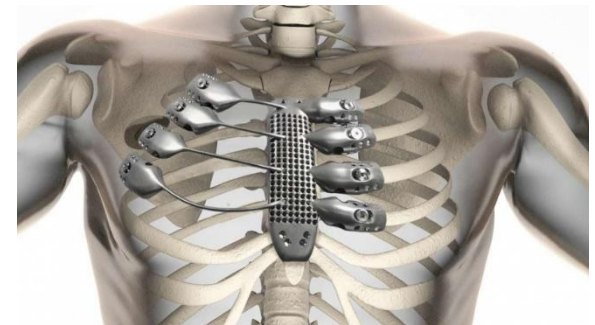
Les secteurs et domaines d'utilisation



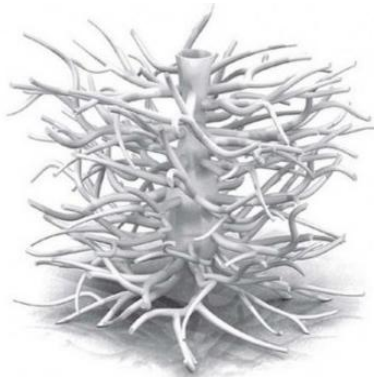
Les secteurs et domaines d'utilisation



aorte imprimée en 2021



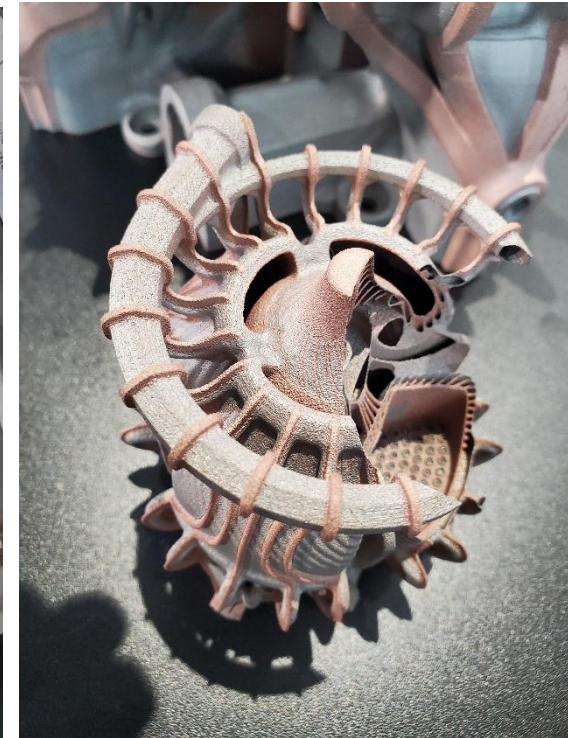
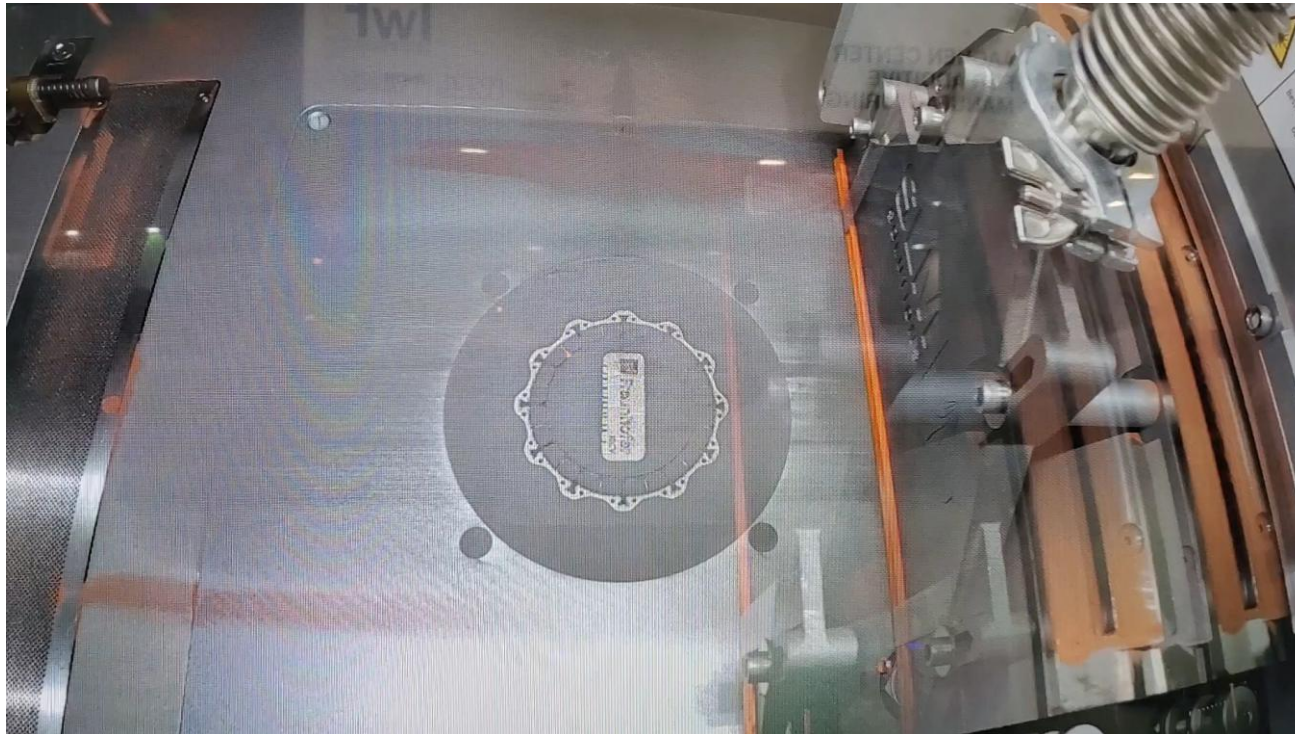
Les secteurs et domaines d'utilisation



.../...

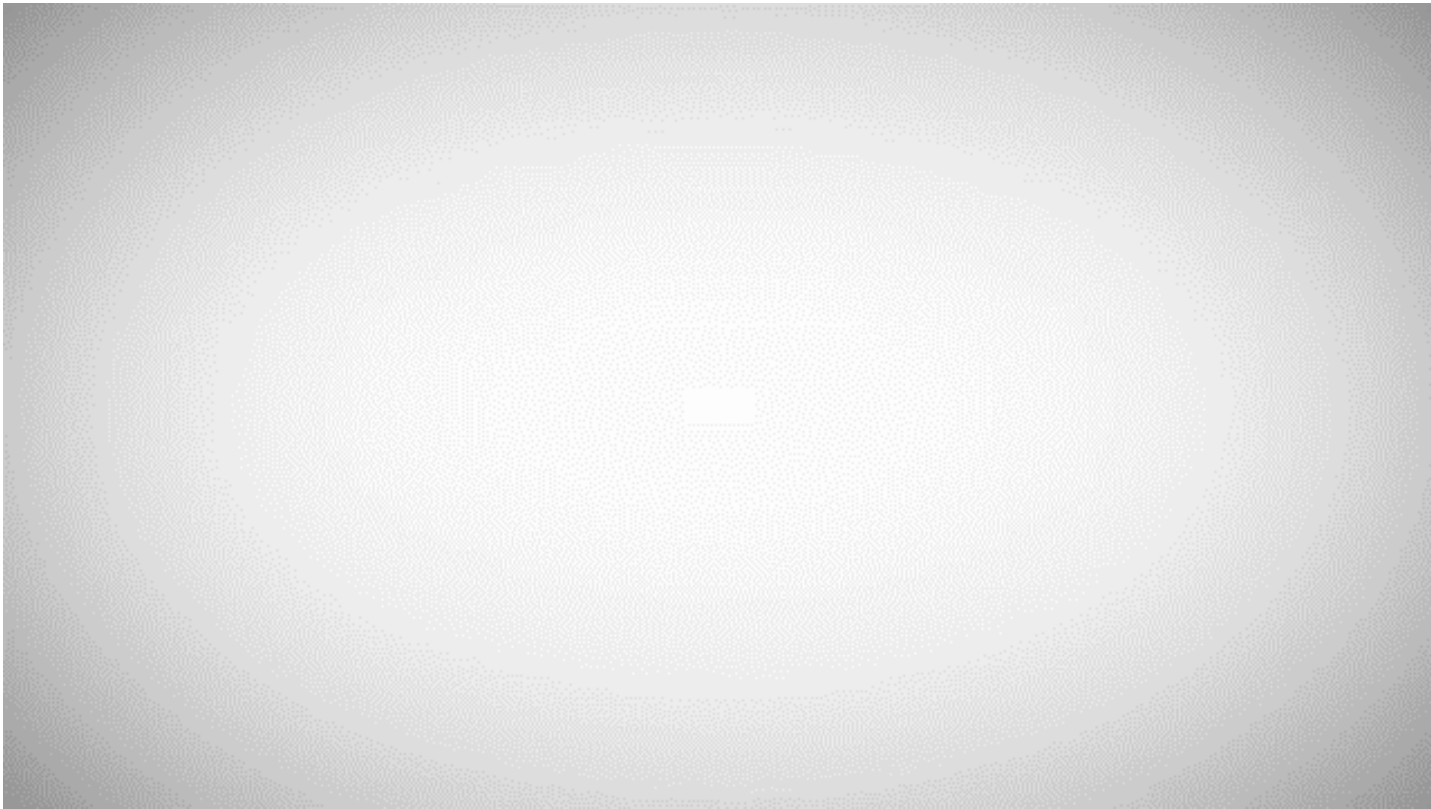
Évolutions des technologies

- L-PBF Multi-matériaux



Évolutions des technologies

- L-PBF Hybride



Évolutions des technologies

- CLAAD Hybride



The end

Avez-vous des questions?