

# INTRODUCTION A LA FABRICATION ADDITIVE

École d'Ingénieurs de Toulon



**Myriam ORQUERA**  
SEATECH

École d'Ingénieurs de Toulon  
[myriam.orquera@univ-tln.fr](mailto:myriam.orquera@univ-tln.fr)



*« les progrès scientifiques les plus extraordinaires, les prouesses techniques les plus étonnantes, la croissance économique la plus prodigieuse, si elles ne s'accompagnent d'un authentique progrès social et moral, se retournent en définitive contre l'homme »*

*Lettre encyclique **laudato si'** du Pape François*

# SOMMAIRE

<b>I.</b>	<b>Qu'est-ce que la Fabrication Additive (FA) ?</b>	<b>4</b>
1)	Les définitions autour de la fabrication additive (NF E 67-001)	4
2)	Le principe général du processus de fabrication additive	4
3)	Les différentes technologies	5
<b>II.</b>	<b>Procédés de FA métallique</b>	<b>6</b>
1)	Fusion sur lit de poudre (PBF : Powder Bed Fusion)	6
2)	Dépôt de matière sous énergie concentrée (Direct Energy Deposition DED)	11
3)	Extrusion de matière de type BMD (Bound Metal Deposition)	15
4)	Projection de liant MBJ (Metal Binder Jetting)	16
5)	Stratification de couches LOM (Laminated Object Manufacturing)	17
6)	Comparatif L-PBF/ EBM/WAAM/ MBJ/ LOM	19
<b>III.</b>	<b>Procédés de FA plastique et autre</b>	<b>20</b>
1)	Fusion LASER lit de poudre (SLS : Selective Laser Sintering)	20
2)	Extrusion de matière	20
3)	Projection de liant BJ (Binder Jetting)	22
4)	Projection de matière	22
5)	Stratification de couches	23
6)	Photo polymérisation en cuve	24
7)	Comparatif SLA-SLS-FdM	26
<b>IV.</b>	<b>LEXIQUE ANGLAIS FRANÇAIS</b>	<b>27</b>
<b>V.</b>	<b>SITOGRAFIE</b>	<b>29</b>
<b>VI.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>29</b>

# LA FABRICATION ADDITIVE

## I. Qu'est-ce que la Fabrication Additive (FA) ?

### 1) Les définitions autour de la fabrication additive (NF E 67-001)

- Fabrication additive : Ensemble des procédés permettant de fabriquer, couche par couche, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique.

Une autre définition plus récente et plus adaptée à toutes les technologies de la fabrication additive est proposée par (Thompson *et al.*, 2016)



- Prototypage rapide : Fabrication additive de pièces prototypes ou de pièces réalisées dans le but de faire des essais.
- Fabrication directe : Fabrication additive de pièces répondant aux caractéristiques fonctionnelles attendues du produit final.

### 2) Le principe général du processus de fabrication additive

- Une pièce ou un assemblage est numérisé sous un logiciel de CAO
- Puis il est enregistré sous format STL, étape de facettisation (tessellation stage). C'est le format d'échange standard simplifiant la géométrie de la pièce en série de facettes de formes triangulaires. La finesse de la facettisation doit être assez importante mais ne doit pas être extrême au risque d'obtenir un fichier trop volumineux comme le montre la Figure 1.

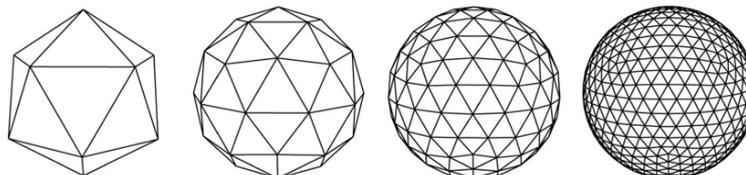


Figure 1 : Influence de la finesse de la facettisation sur la géométrie

- Ce fichier STL sera placé dans l'espace de travail de la machine, puis découpé en tranches. Cette étape est soit réalisée par le logiciel d'interface de la machine, soit par l'utilisateur (à l'aide d'un logiciel appelé « slicer »). En fin, la machine fabrique la pièce couche par couche jusqu'à réalisation de toutes les couches. Le dépôt par couche a pour inconvénient de réaliser l'effet « Staircase» (l'effet escalier) comme le montre la Figure 2, ce qui influe sur l'état de surface (la rugosité).

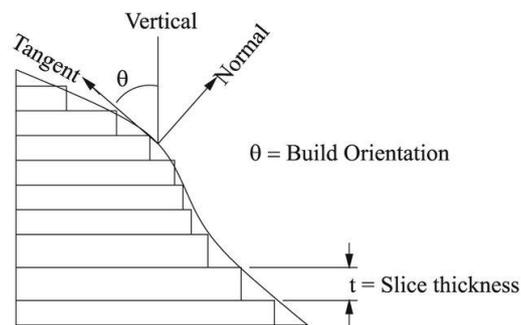


Figure 2 : Staircase effect (l'effet escalier) du procédé de dépôt de couche (Pandey, Reddy and Dhande, 2007)

- Un travail de « parachèvement » est souvent nécessaire : la pièce finit
  - doit être nettoyée de son support (s'il y en a),
  - recevoir un traitement thermique (si nécessaire)
  - doit être usinée pour améliorer l'état de surface (si nécessaire)
  - ...

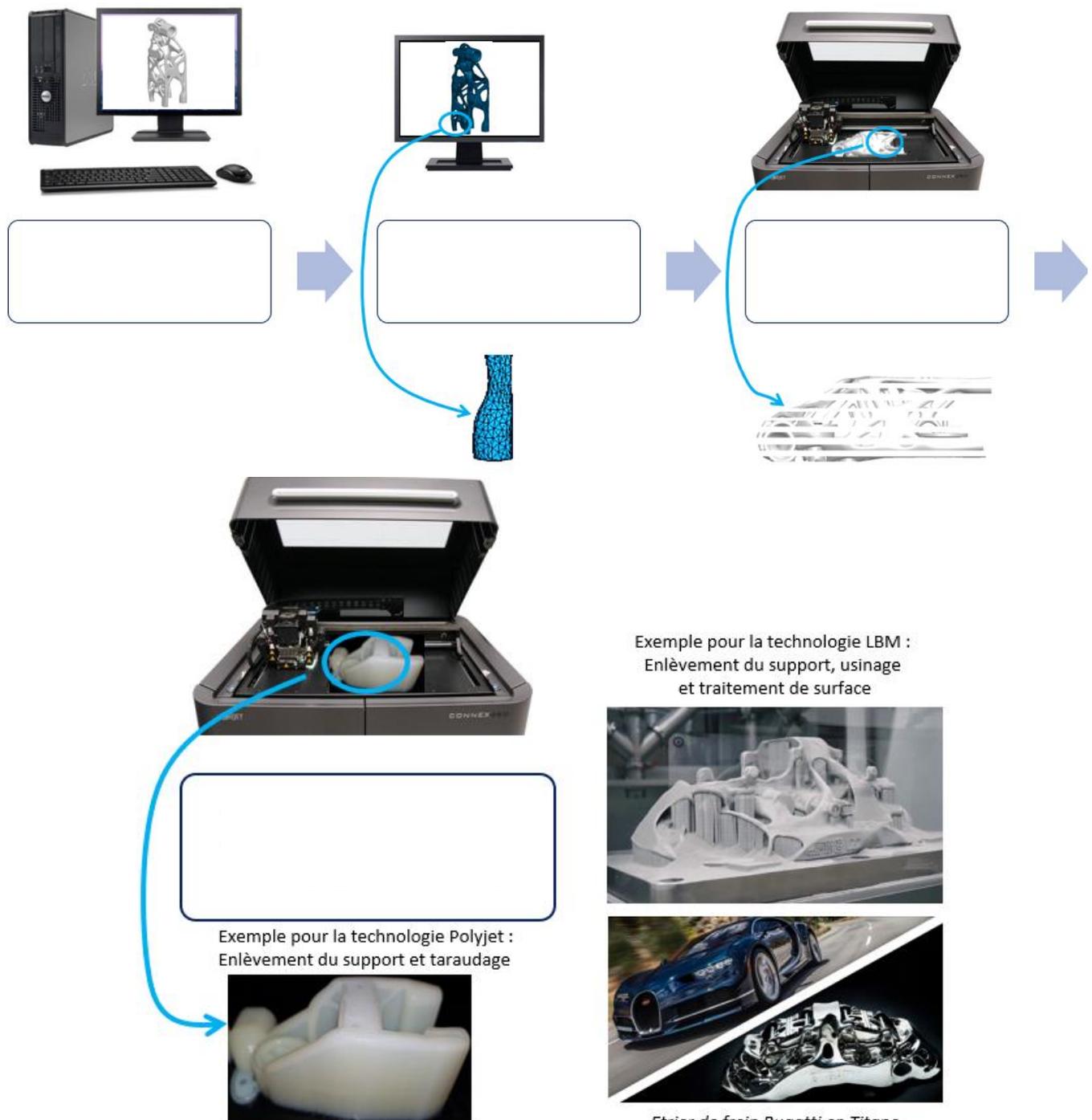


Figure 3 : Processus de la fabrication additive

### 3) Les différentes technologies

Il existe 7 procédés de FA référencés par la norme (AFNOR, 2015). Toutefois, les évolutions technologiques sont telles, que des procédés nouveaux existent sans être référencés par la norme. Nous ne présenterons dans ce polycopié que ceux référencés (Figure 4) et nous commencerons par les procédés métalliques puis les procédés plastiques et autres.

	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
Scheme							
Process	Layer by layer deposition of molten material	Selective curing of photo-curable material in a liquid container	Material deposition and subsequent curing	Selective dispense of binder for joining powder in a bed	Fusing of powder in a bed by melting the selected region	Direct fusion of the material	Bonding of individual sheets of material
Name	FDM RC MJS SFF	SLA DLP LAMP ZPP	DOD MJ NPJ	BJ	SLS SLM DMLS EBM MJF	LENS EBAM DMT	LOM UC

Figure 4 : Les sept procédés de fabrication additive (Dilberoglu *et al.*, 2017)

Ces procédés sont plus ou moins mûres comme le montre la figure suivante.

### Metal AM Maturity Index 2021

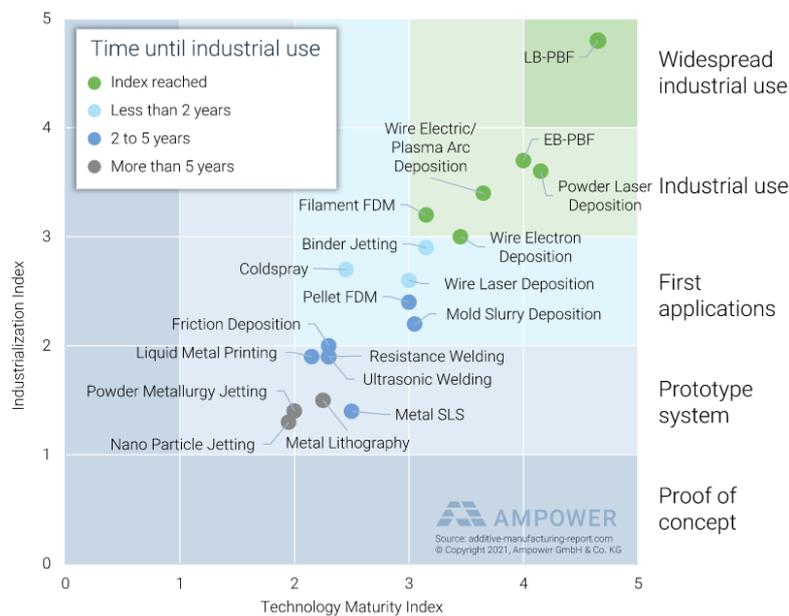


Figure 5 : Maturité des procédés de FA en 2021. Source : additive-manufacturing-report.com/

## II. Procédés de FA métallique

### 1) Fusion sur lit de poudre (PBF : Powder Bed Fusion)

Il existe deux familles :

- Fusion LASER sur lit de poudre
- Fusion par FAISCEAUX d'ELECTRONS sur lit de poudre

Ces 2 technologies réalisent des pièces assez différentes de par leur aspect ou comportement mécanique. La productibilité est aussi différente ainsi que le champ de matériaux utilisé.

### a) Fusion LASER sur lit de poudre L-PBF

L'appellation la plus courante est le L-PBF (Laser Powder Bed Fusion) ou encore le SLM (Selective Laser Melting). Il est possible de le trouver sous le nom de LBM (Laser Beam Melting) ou DMLS (Direct Metal Laser Sintering).

#### (i) Principe

Dans l'enceinte inerte de la machine se trouve le plateau (building platform) sur lequel va se fabriquer la pièce. Une fine couche de poudre (powder layer) métallique (granulométrie 10 à 40 $\mu$ m) y est déposée et aplaniée grâce au racleur. Un laser à forte puissance (Laser à CO<sub>2</sub> par exemple) vient alors porter à fusion la poudre aux bons endroits de la surface de production. Le plateau descend puis reçoit une nouvelle couche de poudre et le cycle reprend jusqu'à la fin de la production.

La poudre non utilisée peut être recyclée.

Les matériaux utilisés sont par exemple : L'acier, l'aluminium, le titane.

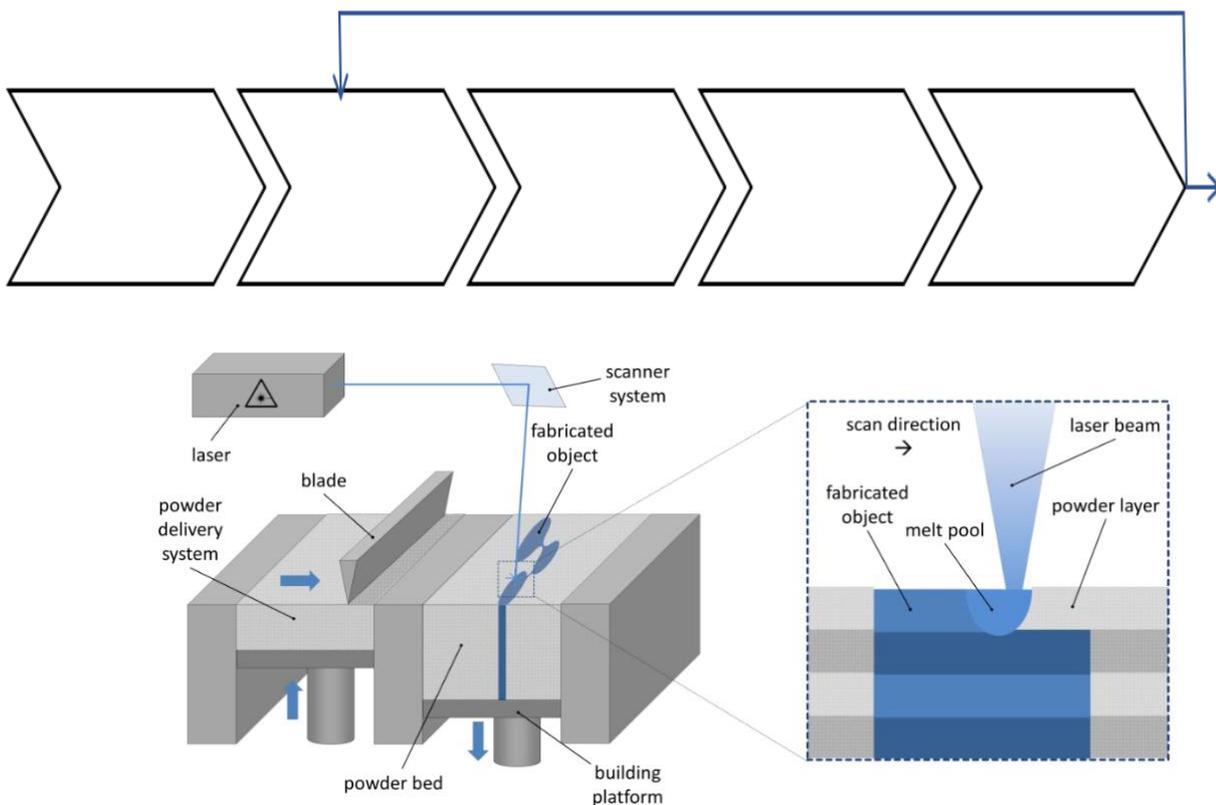


Figure 6 : Principe de la technologie L-PBF (Leitz et al., 2017)

#### (ii) Problématique de cette technologie

☞ Les scories

Pour les procédés L-PBF, les scories sont des rebuts de poudre fusionnée. Ce défaut apparaît essentiellement sur des surfaces en porte à faux.

Lorsque le laser irradie une épaisseur de poudre métallique posée sur une partie solide, cette dernière permet l'évacuation thermique.

Lorsque le laser irradie une couche de poudre posée sur de la poudre, cette dernière remplit le rôle d'isolant thermique. L'apport d'énergie donné par le faisceau laser, absorbé par la couche de poudre sera ainsi beaucoup plus important, ce qui entraînera une trop grande accumulation du bain de fusion et une pénétration dans la poudre sous l'effet de la gravité et des forces capillaires.

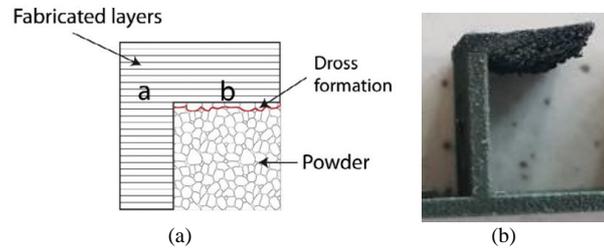


Figure 7. (a) Scories sur surface en porte à faux pour LBM (Calignano, 2014); (b) Mise en évidence du phénomène de scorie lors d'impression de porte à faux (Imprimé sous LBM par MAQ-3D)

☞ Phénomène de gauchissement (warping)

Le défaut de gauchissement est essentiellement dû au retrait de la matière lors du refroidissement de la pièce. La poudre entourant la pièce fabriquée pour les procédés par fusion sur lit de poudre fait office d'isolant thermique. Le plateau sur lequel repose la pièce est le principal élément permettant d'évacuer l'apport de chaleur du faisceau. Les couches de matière en porte à faux refroidiront en dernier lieu en subissant ce phénomène de retrait et par conséquent de gauchissement (Wang *et al.*, 2013). Le défaut de gauchissement de la surface en porte à faux est également dû à l'absence de supports permettant d'assurer son « bon collage » avec les couches précédentes.

(Kruth *et al.*, 2004) ont étudié le mécanisme de gradient de température pouvant expliquer le phénomène de déformation. Lorsque la contrainte thermique dépasse la résistance du matériau, il se produit une déformation plastique.

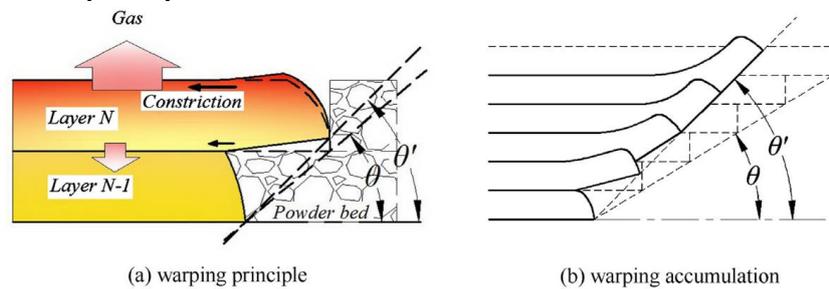


Figure 8. Déformation plastique des surfaces en porte à faux dû au gauchissement (Wang *et al.*, 2013)

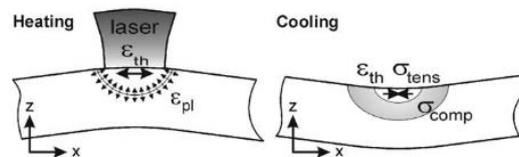


Figure 9. Gauchissement de surface (Kruth *et al.*, 2004)

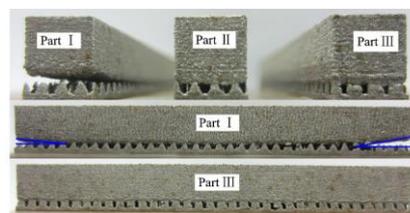


Figure 10. Impact du support sur le gauchissement (Liu, Yang and Wang, 2016)

☞ Solution proposée

Afin d'éviter ces défauts de fabrication, la mise en place de support est nécessaire sur les surfaces en porte à faux et les surfaces subissant le plus de distorsions. Afin d'enlever les supports, il faut utiliser une machine électroérosion au fil puis des outils d'usines.

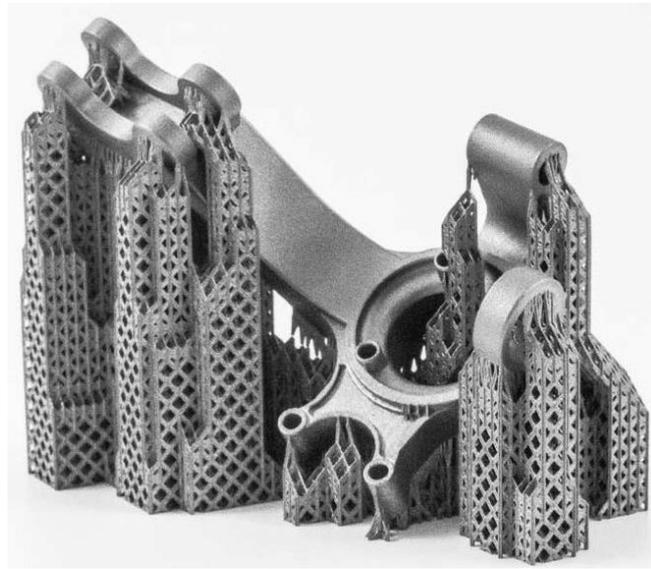


Figure 11. Supports nécessaires pour la fabrication

La minimisation des supports sera traitée dans la suite du cours.

### **(iii) Exemple d'application**

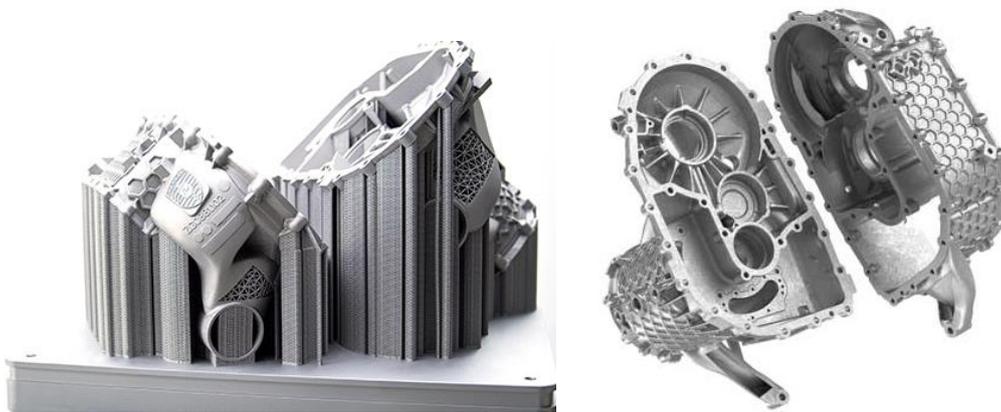


Figure 12. Carter de transmission électrique pour une Porsche, fabriqué par L-PBF, sur le plateau d'impression à gauche et post-traitée à droite. Source : [www.slm-pushing-the-limits.com/](http://www.slm-pushing-the-limits.com/)

### **b) Fusion par FAISCEAU D'ELECTRONS sur lit de poudre EB-PBF**

L'appellation la plus courante est EBM (Electron Beam Melting) ou encore EB-PBF (Electron Beam Powder Bed Fusion).

#### **(i) Principe**

La technologie EBM est similaire, sur le principe, à la technologie L-PBF puisqu'il s'agit également de la fusion d'un lit de poudre.

Cette technologie préchauffe la poudre de métal (granulométrie 40 à 120 $\mu$ m) à une température supérieure au LBM (entre 700° et 1000°C), ce qui permet de produire des parties métalliques très denses et donc de conserver les caractéristiques du matériau utilisé. Puis, des électrons, projetés à très grande vitesse à travers un faisceau étroit, permettent de fondre et de fusionner les particules de métal. Parmi les matériaux utilisables par cette technologie, on retrouve l'alliage de titane, mais aussi le cuivre, le niobium, l'AL 2024, le verre métallique massif, l'acier inoxydable.

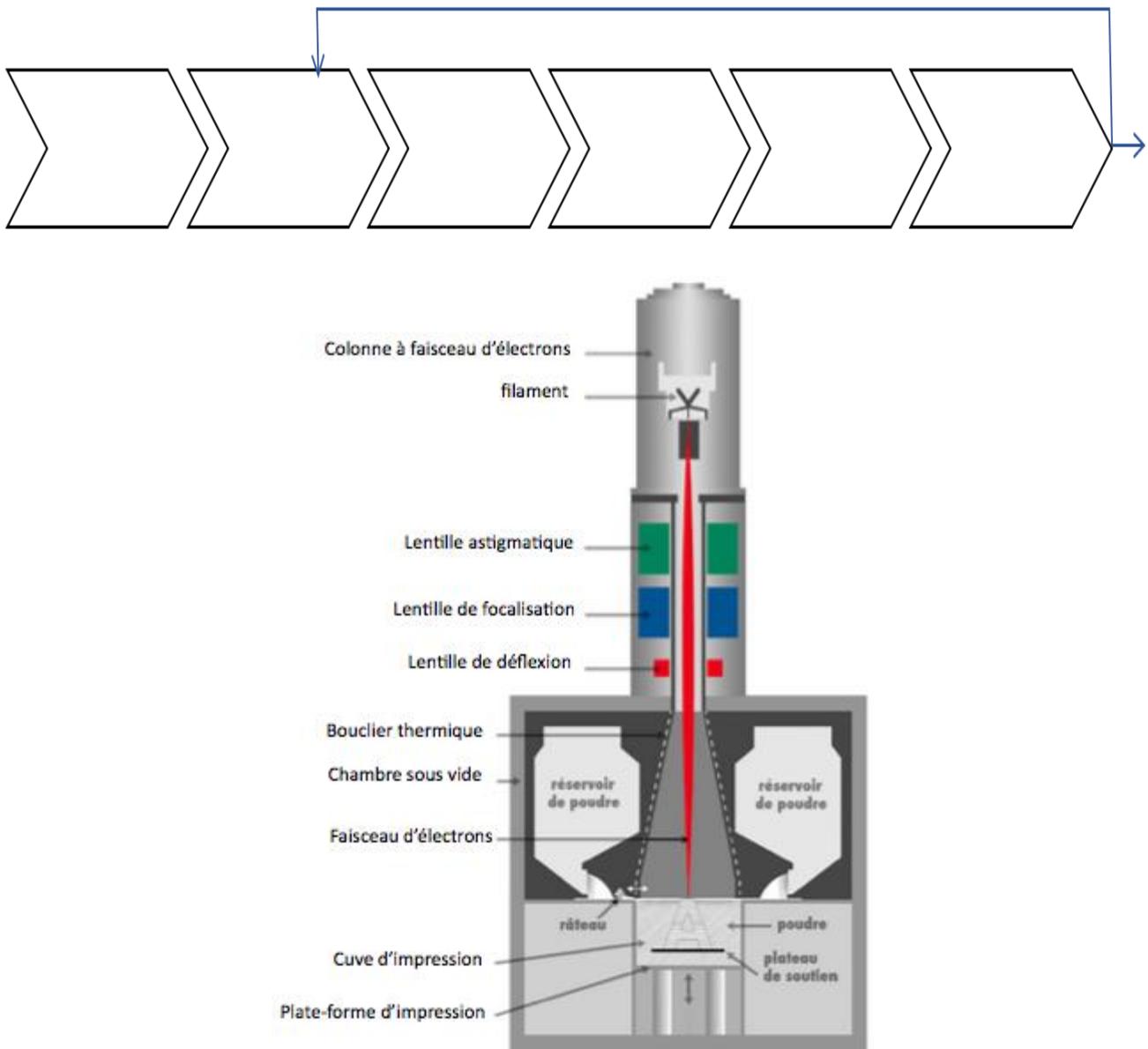


Figure 13 : Schéma de principe de l'EBM

### (ii) Problématique de cette technologie

La poudre étant préchauffée elle est dite autoportante. Cela signifie que les surfaces en porte à faux sont maintenues lors de leur impression. Ainsi pour l'EBM, il n'y a pas besoin de support pour les portes à faux.

Pour ces technologies à fort apport de chaleur, les supports sont nécessaires pour réaliser un transfert thermique.

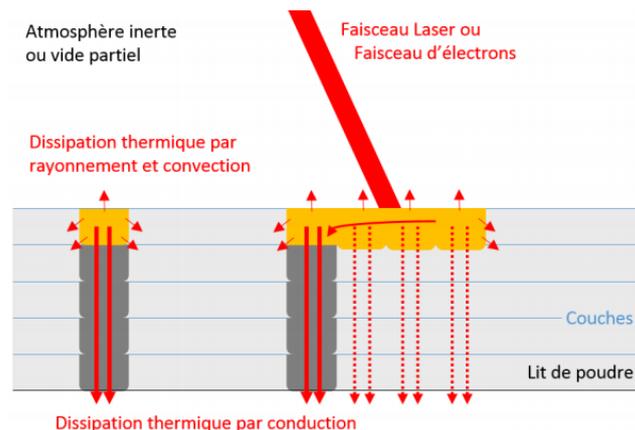


Figure 14 : Exemple de dissipation thermique pour des formes à éviter. Source (Vayre, 2014)

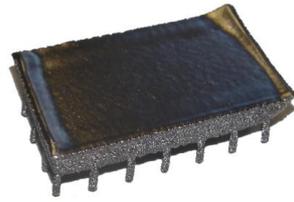


Figure 15 : Déformations géométriques à cause du trop faible nombre de supports (structures cylindriques sous la pièce) (Vayre, 2014)

Pour l'EBM, les supports s'enlèvent aisément à la main.

### **(iii) Exemple d'application**



Figure 16 : Corps de refroidisseur réalisé par EBM

### **c) Avantages/Inconvénients**

☞ Avantages du LBM par rapport à l'EBM

- Meilleures caractéristiques mécaniques
- État de surface meilleur
- Épaisseur des strates (couches) plus fines
- Complexité et détails des pièces
- Choix de matériaux important (une vingtaine)
- Enlèvement de la poudre plus facile
- Temps de refroidissement deux fois plus court
- Matériaux non-conducteurs possibles

☞ Avantages de l'EBM par rapport au LBM

- Pas de traitement thermique
- Peu de supports nécessaires
- Supports très faciles à enlever
- Bon pour les pièces massives
- Fabrication sous vide
- Meilleure production (rapidité + empilement des pièces)

## **2) Dépôt de matière sous énergie concentrée (Direct Energy Deposition DED)**

Appelé aussi DMD (Direct Metal Depositing), ce procédé de fabrication additive possède principalement deux familles que nous détaillerons dans ce polycopié :

- Construction Laser Additive Directe (CLAD)
- Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)

### a) CLAD

Les autres appellations sont :

CLAD ou EasyClad (Construction Laser Additive Directe)

LDT (Laser Direct Technology)

LMD (Laser Metal Deposition)

Laser Powder DED (LP-DED)

#### (i) Principe

Une buse est fixée à la place de l'outil dans une machine 5 axes. Cette buse projette le métal sous forme de poudre et le fusionne directement par un faisceau laser.

Cette technologie s'éloigne un peu de la définition de la fabrication additive couche par couche et dépose la matière ligne par ligne. La taille des particules de poudre est similaire à celle utilisée dans les procédés de métallurgie des poudres, à savoir entre 50 et 150 microns.

En ce qui concerne les matériaux utilisés, presque tous ceux qui sont soudables peuvent être imprimés en 3D par dépôt sous énergie concentrée. Cela comprend le titane et les alliages de titane, l'inconel, le tantale, le tungstène, le niobium, l'acier inoxydable, l'aluminium, etc.



Figure 17 : Vue en écorchée d'une tête de projection CLAD (à gauche) Principe du procédé (à droite). Source : dma-laser.fr

Cette technologie ne nécessite pas de support car chaque ligne déposée est le support de la suivante. Toutefois les premières lignes sont déposées sur un plateau qu'il faudra enlever à l'aide d'une machine électroérosion au fil.

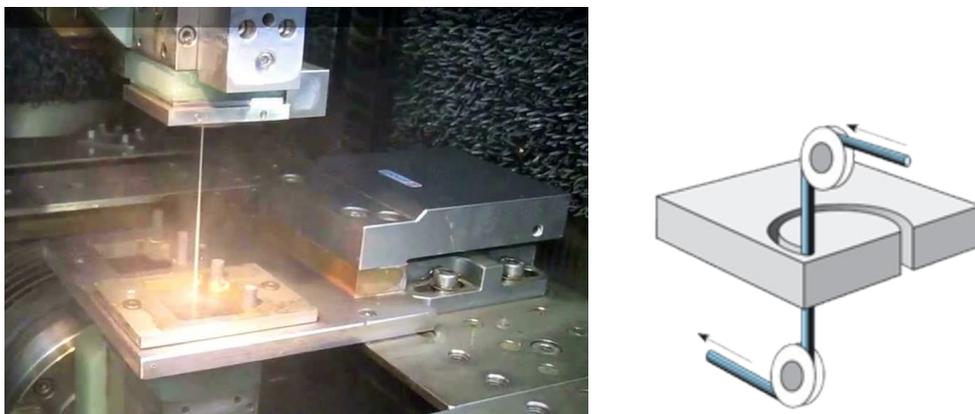


Figure 18 : Photo du procédé (source : Prototec), image du principe (source : <http://www.schiltz.be>)

**(ii) Exemple d'application**

Figure 19 : Conduits aéronautiques obtenus par projection de poudres (Le Bourhis, 2014)

**b) WAAM**

Autre appellation : Arc Wire DED (AW-DED)

**(i) Principe**

Le WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) est un procédé de fabrication additif par soudage à l'arc électrique (alors que le CLAD est par faisceau). Selon la norme ASTM F 279-12A le WAAM est défini comme la combinaison d'un arc électrique utilisé comme source de chaleur et d'un fil utilisé comme apport de matières premières. Le fil utilisé a généralement un diamètre compris entre 1 et 3 mm.

Les matériaux utilisés sont les mêmes que pour le CLAD.

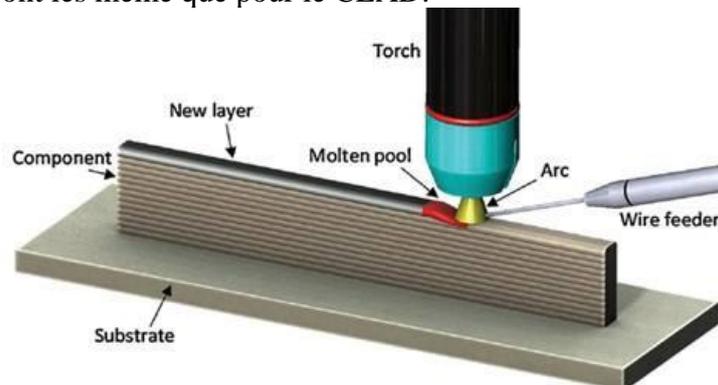


Figure 20 : Image du principe (source : Dassault Systèmes)

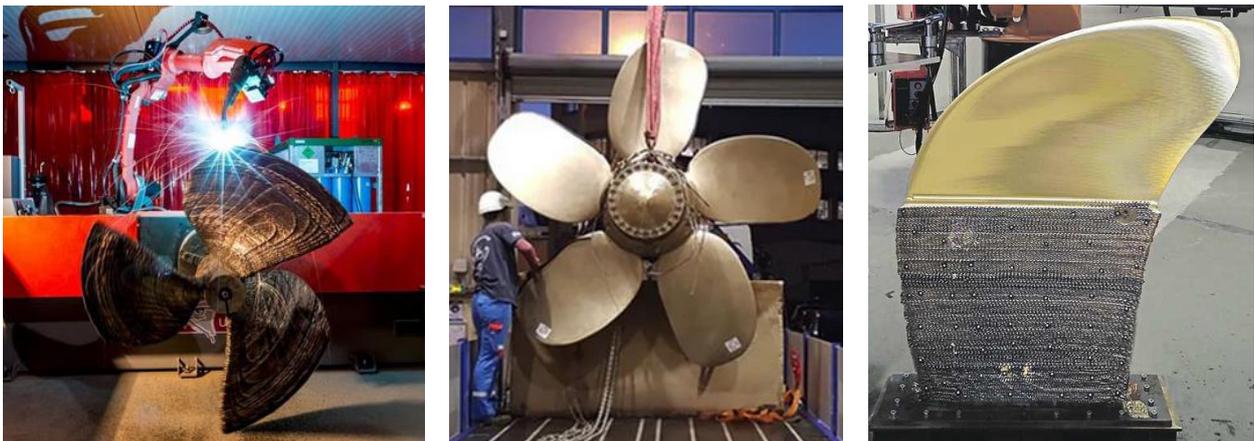
**(ii) Exemple d'application**

Figure 21 : A gauche, une hélice en cours de fabrication ; Au milieu, hélice installée en 2021 sur un bateau de la marine nationale ; A droite, hélice brute de fabrication en bas et usinée sur la partie haute.



Figure 22 : Pont en acier imprimé par WAAM par la société MX3D, installé dans la ville d'Amsterdam

### c) Avantages/Inconvénients

L'une des applications uniques de cette technologie est qu'il est possible de réparer des pièces métalliques endommagées.

Selon [ASTM International](#) : *“Le dépôt sous énergie concentrée a la capacité de produire des pièces relativement grandes (volume de construction > 1000 mm<sup>3</sup>) nécessitant un outillage minimal et relativement peu de post-traitement. De plus, les procédés DED peuvent être utilisés pour produire des composants avec des gradients de composition ou des structures hybrides constituées de plusieurs matériaux ayant des compositions et des structures différentes.”*

- + Absence de support
- + Possibilité de réparer et/ou d'ajouter des fonctions à des pièces
- + 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
- Formes de pièces peu complexes
- Temps de fabrication

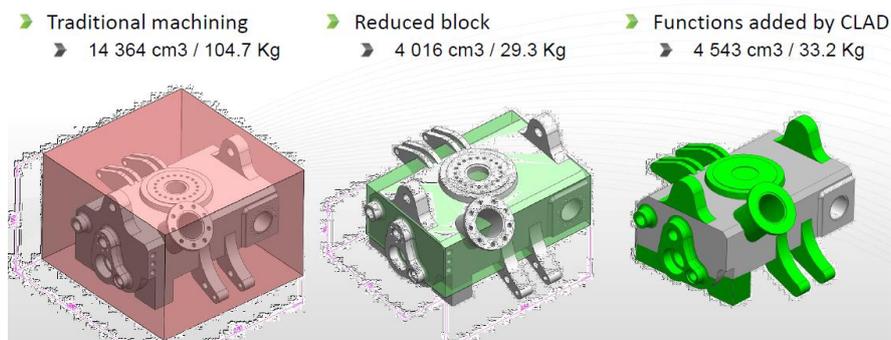


Figure 23 : Rajout de fonctions sur un bloc métallique (Frechard 2015)

### 3) Extrusion de matière de type BMD (Bound Metal Deposition)

#### a) Principe

L'impression BMD est équivalente à une impression de type FdM. Les différences résident en la matière première qui se présente sous forme de tiges de métal liées (mélange poudre de métal aggloméré à l'aide d'un liant polymère ou cire).

Réalisé par Desktop Metal Studio System ce processus est en trois étapes :

- Les tiges sont acheminées par une extrudeuse chauffée sur la plaque de construction. L'imprimante façonne la pièce couche par couche, ligne par ligne, pour produire une pièce imprimée, ou "pièce verte".
- La pièce verte est ensuite placée dans le débrideur où elle est immergée dans un fluide de débridement exclusif, dissolvant le liant primaire et créant une structure de canal à pores ouverts pour préparer la pièce au frittage. Une fois le cycle de déliantage terminé, la pièce est dite "brune".
- La pièce brune est placée dans le four où elle est chauffée à des températures proches de la fusion, ce qui élimine le liant restant et provoque la fusion des particules de métal au moment du frittage de la pièce. Cette étape nécessite des considérations de conception propres au dépôt de métal composite car le frittage a des implications sur les caractéristiques de la pièce, l'orientation de la construction et les structures de support.

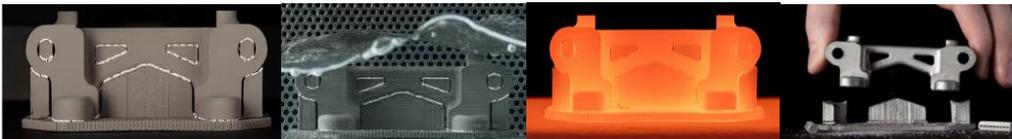
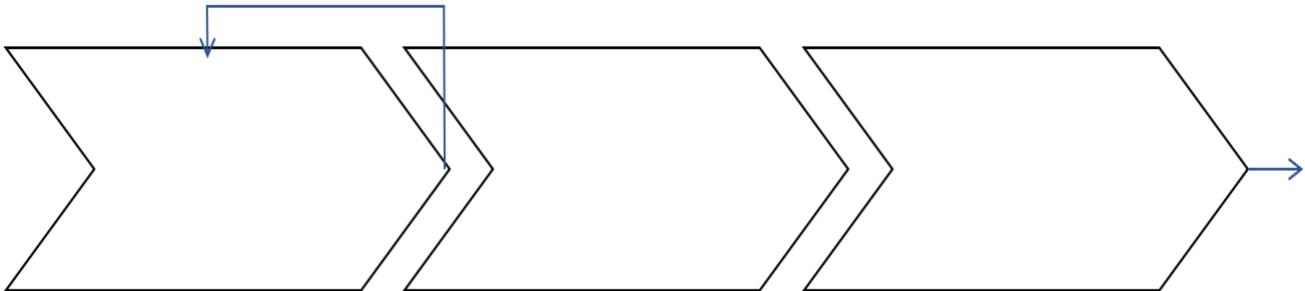


Figure 24 : Etapes de fabrication du BMD. De gauche à droite, la pièce imprimée appelée pièce verte, phase de déliantage, puis la phase de frittage, élèvement du support et à droite la pièce finit

Les matériaux sont des alliages d'acier, de cuivre et de titane.

#### b) Exemple d'Application



Figure 25 : Pince fonctionnelle réalisée par BMD. Source : objective3d.com.au

#### c) Avantages/Inconvénients

L'avantage majeur de la BMD face au SLM est le fait que l'on ne travaille pas directement avec les poudres de métal : en effet, celles-ci sont enfermées dans le liant.

Le coût est également un avantage non négociable : l'équipement coûte en moyenne 3x moins cher qu'une solution de frittage laser.

Il y a tout de même quelques choses à prendre en considération : une machine BMD ne sera pas aussi précise qu'une machine de frittage laser.

Par contre, il est tout à fait possible de post-traiter les pièces afin d'arriver à un résultat satisfaisant.

#### **4) Projection de liant MBJ (Metal Binder Jetting)**

##### **a) Principe**

Le MBJ se déroule en plusieurs étapes :

- La fabrication d'une pièce verte puis la consolidation par déliantage-frittage. Un liant est déposé sur des couches de poudres métalliques selon la forme et la section correspondantes à la pièce désirée.
- La pièce est ensuite « consolidée » en plusieurs étapes. L'étuvage va permettre de durcir les pièces vertes, de les récupérer et de les manipuler. Le dépoudrage va supprimer la poudre non agglomérée.
- Le déliantage consiste à éliminer le liant organique de la pièce par des mécanismes d'évaporation-décomposition afin de ne laisser qu'une pièce métallique à la porosité encore élevée.
- Enfin, l'étape de frittage, consistant à soumettre la pièce à une température de fusion du matériau pour fritter la poudre, donne à la pièce sa forme finale. Le procédé MBJ est proche de celui du MIM (*Metal Injection Molding*) dans lequel la pièce verte est obtenue par injection dans un outillage. Les processus de consolidation et de frittage sont identiques.

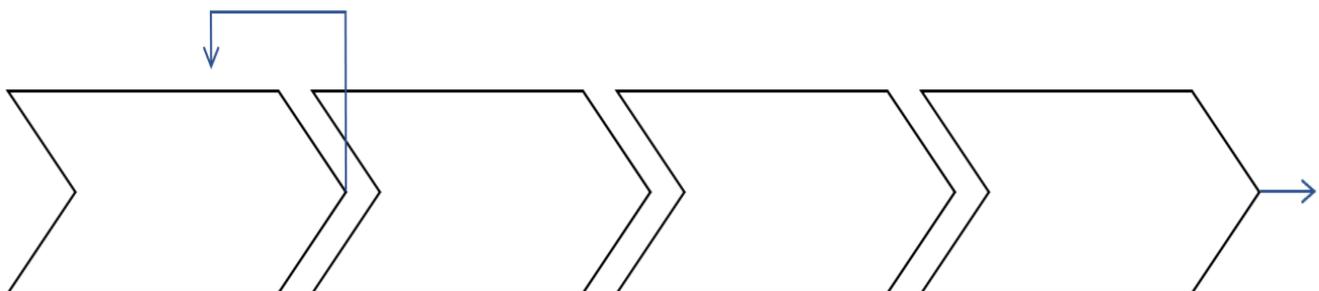
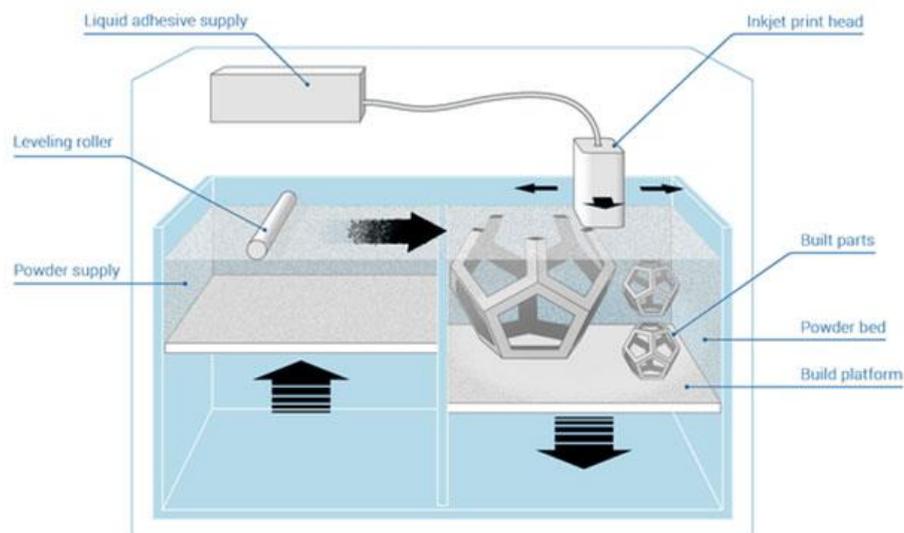


Figure 26 : Principe du processus. Source : 3dnatives.com

## b) Avantages/Inconvénients

L'état de surface et la productivité de ces procédés font l'attrait de ces technologies. Cependant, il faut anticiper le retrait dimensionnel pendant le frittage dès la conception, ce qui nécessite une bonne connaissance de la technologie. Le temps de cycle global est également allongé par les différentes phases de fabrication : impression, étuvage, déliantage et frittage.

Avantages :

- Grande productivité
- Pas de support
- Grande finition

Inconvénients :

- Dimensions faibles
- Toutes les formes des pièces ne sont pas possibles
- Retrait des surfaces lors du frittage (de 12 à 20%)



Figure 27 : Exemples de pièces réalisées par MBJ avant et après frittage

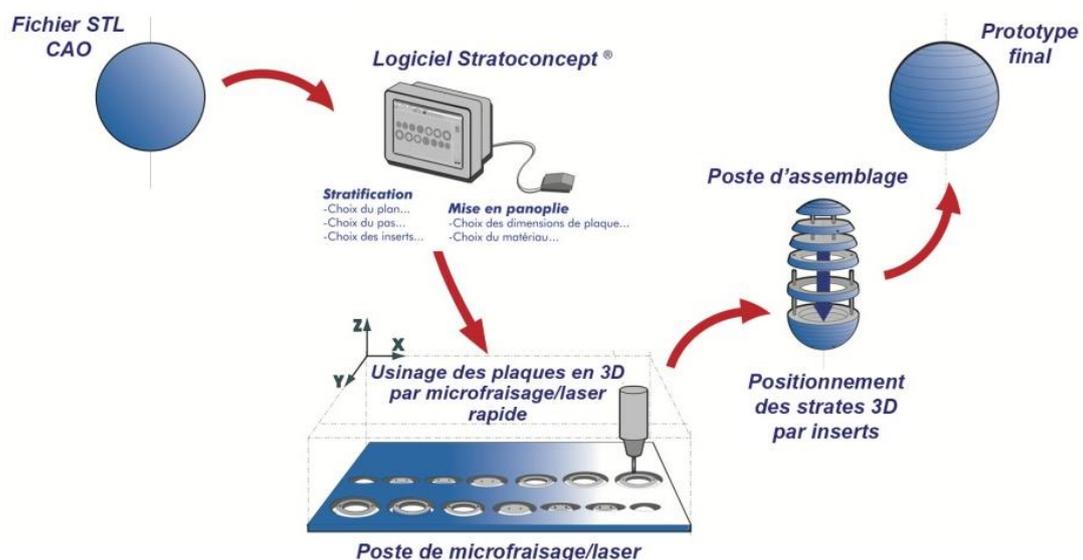
## 5) Stratification de couches LOM (Laminated Object Manufacturing)

### a) Les différentes appellations

Stratoconception, LOM (Laminated Object Manufacturing)

### b) Principe

À partir du tranchage du fichier STL, on découpe dans des plaques (strates) d'acier, de bois ou autre les contours dans lesquelles sont placés des inserts de positionnement. Chaque strate est ensuite collée (ou soudée) à la suivante. L'ensemble des strates forment la pièce.



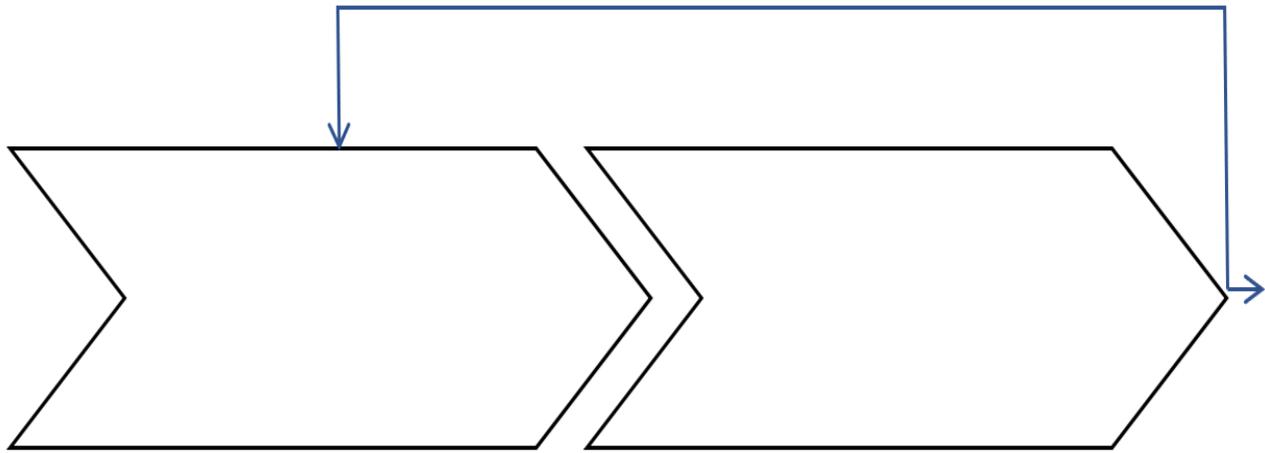


Figure 28 : Principe du procédé. Source <http://www.stratoconception.com>

**c) Avantages/Inconvénients**

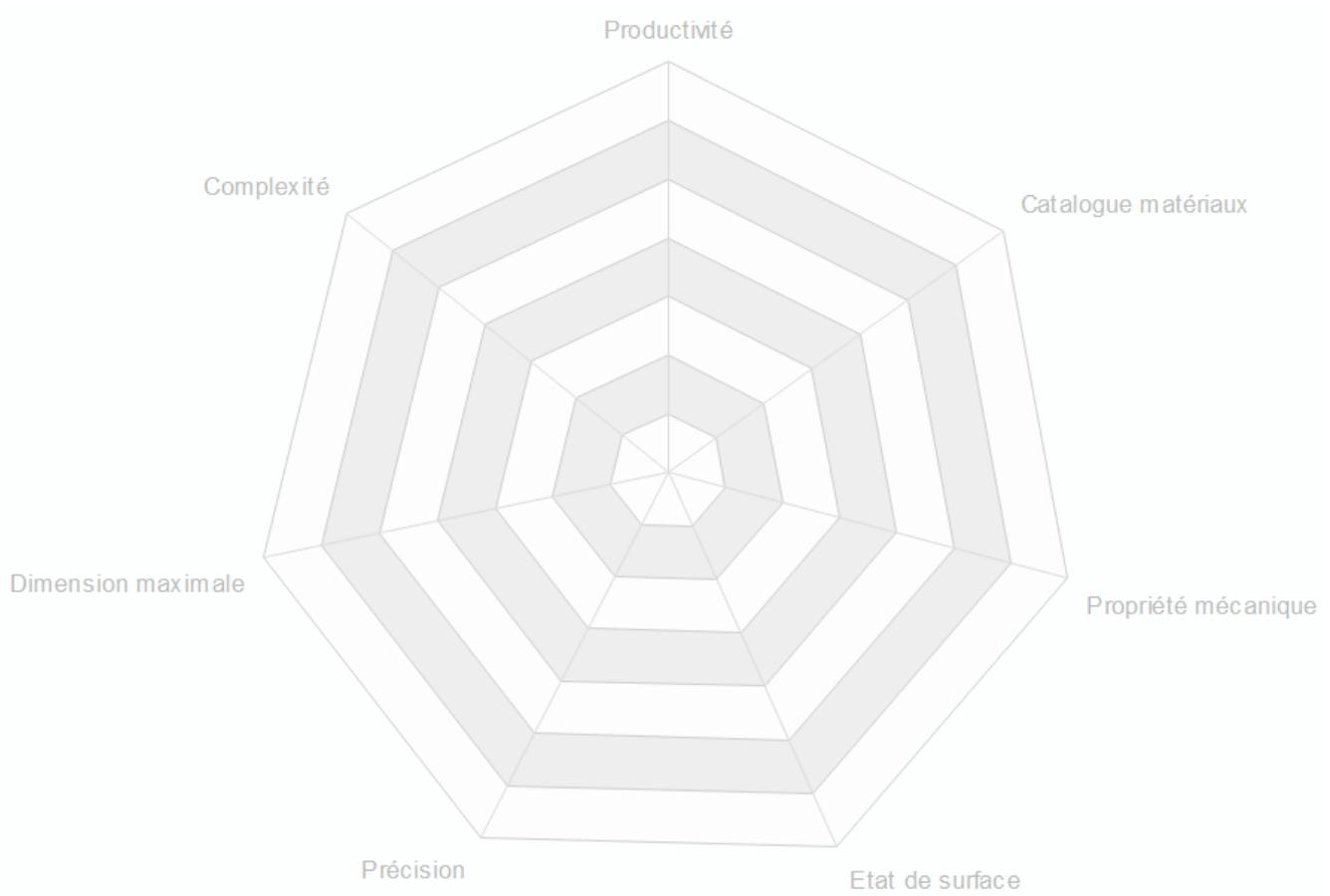
- + Grandes pièces,
- + Matériaux très divers
- + Coût machine et de production très raisonnable
- + Facilité d'approvisionnement matière
- + Temps de réalisation des pièces réduit
  
- Besoin de finition (joints de plaques)
- La mise en place de strates fastidieuse.

**d) Exemples d'applications**



Figure 29 : Moule pour injection soufflage « Végétal Minéral Water ». Source <http://www.stratoconception.com>

**6) Comparatif L-PBF/ EBM/WAAM/ MBJ/ LOM**



### **III. Procédés de FA plastique et autre**

#### **1) Fusion LASER lit de poudre (SLS : Selective Laser Sintering)**

##### **a) Principe**

Le principe est identique au L-PBF à la différence que la poudre est plastique et non métallique. La poudre est déposée sur le plateau, aplaniée puis le faisceau laser fusionne les particules entre elles. Dans cette technologie la poudre agit comme un support, il n'y en a donc pas besoin de supplémentaire.

Les matériaux utilisés sont des thermoplastiques de type Nylon (PA12), l'alumine, thermoplastique élastomères (TPE)...

##### **b) Avantages/Inconvénients**

Les pièces fabriquées par SLS présentent des surfaces légèrement rugueuses, mais les lignes de couche ne sont presque pas visibles. Il est recommandé d'effectuer un polissage par grenailage des pièces SLS pour obtenir une bonne finition de surface.

##### **c) Exemple d'application**



Figure 30 : Vêtement imprimé en SLS. Source : news.softpedia.com/

#### **2) Extrusion de matière**

##### **a) Les différentes appellations**

FDM (Fused Deposition Modeling), FFF (FreeForm Fabrication), 3D Print

##### **b) Principe**

L'impression 3D FDM repose essentiellement sur 2 éléments : Le matériau de modelage et le matériau de support ou de structure. Le matériau de modelage, utilisé sous forme de filaments, est chauffé pour être déposé par couches successives accompagné du matériau de support. Lorsque l'impression est terminée, il suffit de rompre ou de dissoudre le matériau de support pour utiliser l'objet fini.

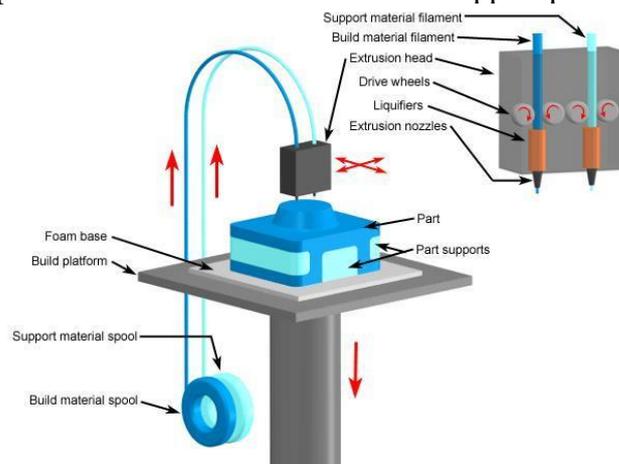


Figure 31 : Principe de l'extrusion de matière. Source : 3Dnatives.com

### c) Support

Cette technologie nécessite du support pour les surfaces qui ont un certain porte à faux. Pour cela, on peut enlever les parties grossières et accessibles à la main, pour le reste, la pièce sera plongée dans un bain d'un liquide diluant (acétone, soude...).



Figure 32 : Exemple de nécessité de support, réalisation de la pièce. Source : (Lefebvre 2015)

### d) Avantages/Inconvénients

- + Procédé peu coûteux
- + Dans le domaine du tout public
- + Suivant la matière (ULTEM par exemple), peut être utilisée comme procédé de fabrication direct
- + Des supports solubles
- État de surface médiocre
- Comportement anisotrope

### e) Exemples d'applications



Figure 33 : Monture de lunette. Source <http://www.erpro.fr> ; Carter de drone

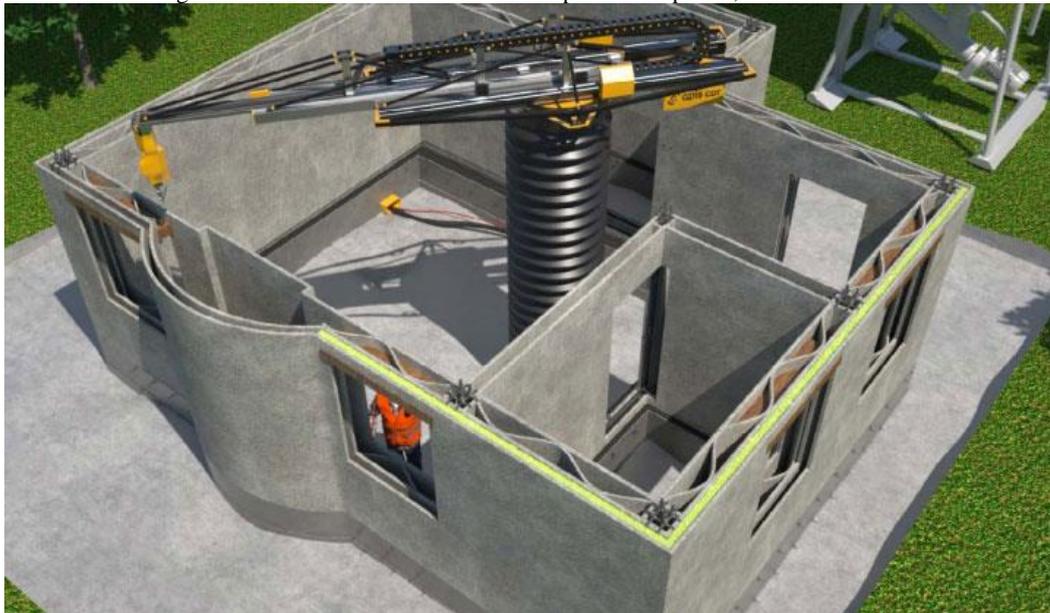


Figure 34 : Construction d'une maison en béton. Source : [www.lesimprimantes3d.fr](http://www.lesimprimantes3d.fr)

### 3) Projection de liant BJ (Binder Jetting)

#### a) Principe

Le principe est identique à celui décrit au chapitre de la FA métallique à ceci près que les phases de déliantage et de frittage ne sont pas utiles.

Un rouleau automatisé répartit une fine couche de poudre sur le plateau de fabrication. La tête d'impression applique un liant liquide contenant la couleur sur la poudre. Le plateau descend pour permettre l'ajout d'une nouvelle couche de poudre. Le procédé est ainsi répété jusqu'à la création de l'objet.

#### b) Avantages/Inconvénients

Avantages :

- Grande productivité
- pas de support
- Impression couleur
- Grandes pièces
- Possibilité de fabriquer des maîtres modèles et de moules céramique pour la fonderie
- Possibilité de pièces souples

Inconvénients :

- Toutes les formes des pièces ne sont pas possibles

#### c) Exemples d'applications



Figure 35 : Prototype de chaussure et de carter Source : <http://www.zcorp.com> ; Moule et noyaux

### 4) Projection de matière

#### a) Les différentes appellations

PolyJet, ou Multi Jet Modeling MJM, Multi Jet Printing MJP

#### b) Principe

Une tête d'impression dépose de fines gouttelettes de résine photosensible. La résine est polymérisée au fur et à mesure grâce à une lampe UV fixée à la tête.

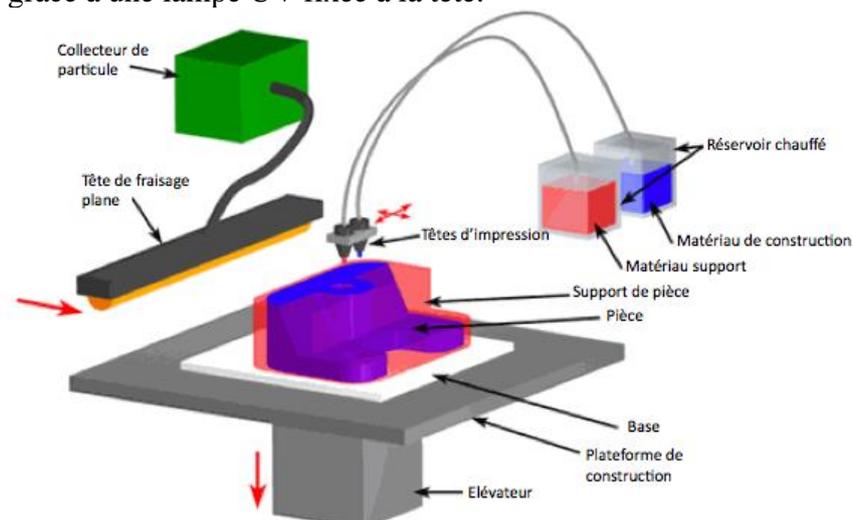


Figure 36 : Principe de la MJM. Source <http://prismadd.com>

Les dernières machines polyjet proposent des supports solubles.



Figure 37 : Exemple d'une clef à molette sans puis avec le support partiellement enlevé à la main

### c) 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

### d) Exemples d'applications



Figure 38 : Casque de vélo. Source mcad.com A droite : Phare

## 5) Stratification de couches

Identique au procédé vu dans le chapitre métallique.



Figure 39 : Emballage Pack'nStrat. Source <http://www.stratoconception.com>

## 6) Photo polymérisation en cuve

### a) Les différentes appellations

- Stéréolithographie, SL ou SLA
- DLP (Digital Light Processing) : Très proche de SLA

### b) Principe

Pour la Stéréolithographie, un laser sert à solidifier certaines zones d'un polymère à l'état liquide dans un bain. Le bain descend petit à petit afin que le laser solidifie la couche supérieure.

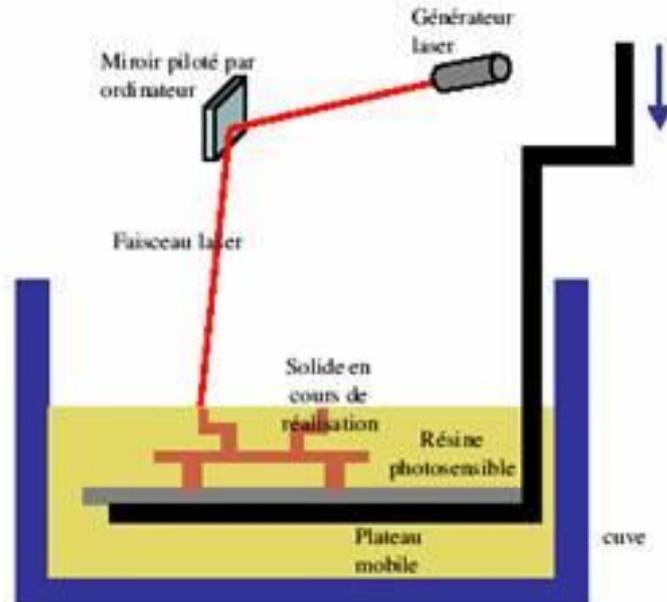


Figure 40 : Principe du procédé. Source : <http://www.proto.fr>

Le DLP utilise un projecteur UV qui va projeter sur la surface de la résine une image. Le principe reste identique à la Stéréolithographie mise à part que le projecteur permet de raisonner directement en couches et non plus en points. En effet, à chaque projection lumineuse, une couche est réalisée. L'enlèvement des supports est assez fastidieux car il est fait à la main.

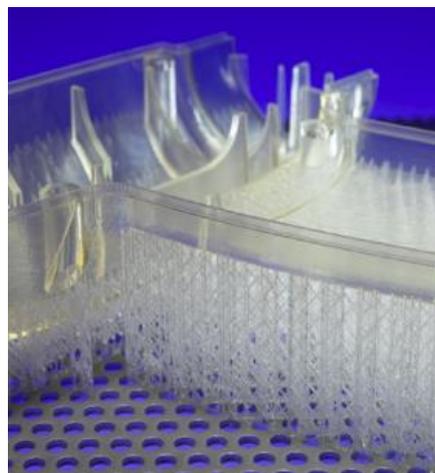


Figure 41 : Pièce réalisée par Stéréolithographie avec le support (source : [www.rtejournal.de](http://www.rtejournal.de))

### c) Avantages/Inconvénients

- + Rapide
- + Précis
- + Possibilité de faire des moules
- + Supports fastidieux à enlever
- + Translucidité

- + État de surface
- + Pièce de très grande dimension
  
- 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

d) **Exemples d'applications**

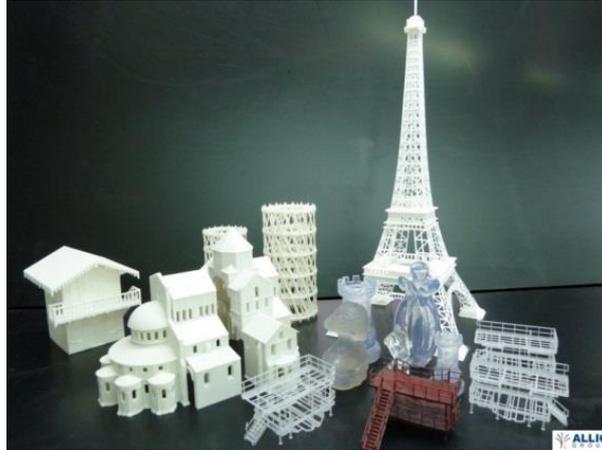


Figure 42 : Diverses réalisations. Source : group-allio.com



Figure 43 : Optique de voiture

## 7) Comparatif SLA-SLS-FdM

Chaque technologie de fabrication additive a ses propres avantages, inconvénients et exigences, et convient à différentes applications et structures. Le tableau suivant résume certaines des caractéristiques majeures à prendre en considération.

	Dépôt de filament fondu (FDM)	Stéréolithographie (SLA)	Frittage Laser Sélectif (SLS)
<b>Résolution</b>	★★☆☆☆	★★★★★	★★★★☆
<b>Précision</b>	★★★★☆	★★★★★	★★★★★
<b>Finitions</b>	★★☆☆☆	★★★★★	★★★★☆
<b>Volume de production</b>	★★★★☆	★★★★☆	★★★★★
<b>Complexité du design</b>	★★☆☆☆	★★★★☆	★★★★★
<b>Simplicité d'utilisation</b>	★★★★★	★★★★★	★★★★☆
<b>Avantages</b>	Rapide Machines et consommables bon marché	Excellent rapport qualité-prix Haute précision Finitions lisses Large gamme d'applications fonctionnelles	Pièces fonctionnelles robustes Liberté de design Pas besoin de supports
<b>Inconvénients</b>	Faible précision Low details Compatibilité de design limitée	Volume de production moyen Sensible à l'exposition longue durée aux rayons UV	Finitions légèrement rugueuses Choix de matériaux limité
<b>Applications</b>	Prototypage rapide bon marché Modèles conceptuels basiques	Prototypage fonctionnel Applications dentaires Prototypage et moulage pour joaillerie Modélisme	Prototypage fonctionnel Production industrielle de pièces personnalisées, pour le court-terme, ou de transition
<b>Volume d'impression</b>	Jusqu'à ~200 x 200 x 300 mm (imprimantes 3D de bureau)	Jusqu'à 145 x 145 x 175 mm (imprimantes 3D de bureau)	Jusqu'à 165 x 165 x 320 mm (imprimantes 3D pour atelier)
<b>Matériaux</b>	Thermoplastiques standards (similaires à l'ABS, PLA, etc).	Larges gammes de résine (plastiques à thermofixation). Classique, pour l'ingénierie (similaire à l'ABS, PP, flexible, résistante à la chaleur), calcinable, dentaire, et médicale (biocompatible).	Plastiques à thermofixation pour l'ingénierie. Nylon 11, Nylon 12 et leurs composites.
<b>Formation nécessaire</b>	Formation minimale sur la mise en place, le fonctionnement de l'appareil et la finition des pièces. Formation modérée sur la maintenance.	Appareil prêt-à-l'emploi. Formation minimale sur la mise en place, la maintenance, le fonctionnement de l'appareil et la finition des pièces.	Formation modérée sur la mise en place, la maintenance, le fonctionnement de l'appareil et la finition des pièces.
<b>Prérequis pour l'environnement de travail</b>	Environnement avec conditionnement d'air et si possible ventilation adaptée aux appareils de bureau.	Appareils pouvant être installés dans des bureaux.	Atelier avec des besoins d'espace faibles, similaires à ceux d'appareils sur établi.
<b>Équipement supplémentaire</b>	Système d'enlèvement des supports solubles (automatisation possible), outils de finition.	Poste de post-traitement par cuisson UV, poste de lavage (automatisation possible), outils de finition.	Station de post-traitement après impression pour le nettoyage des pièces et la récupération des matériaux.

Tableau comparatif. Source : <https://formlabs.com>

**IV. LEXIQUE ANGLAIS FRANCAIS**

<b>English</b>	<b>Français</b>
3D bioprinter	imprimante 3D bio compatible
3D CAD	CAO 3D
3D CAM	FAO 3D
3D printer	imprimante 3D
3D printing (3DP)	impression 3D
3D scanning; 3D digitizing	numérisation 3D
additive manufacturing (AM)	fabrication additive (FA)
additive manufacturing (AM) process	procédé de fabrication additive (FA)
additive manufacturing file format (AMF)	format de fichier pour la fabrication additive (AMF)
additive systems	machine de fabrication additive
	système de fabrication additive
additive layer manufacturing (ALM)	fabrication additive par couches
binder jetting	projection de liant
CAD driven direct manufacturing	fabrication directe pilotée par CAO
Computer Numerical Control (CNC)	commande numérique par ordinateur (CNC)
Computer-Aided Design (CAD)	conception assistée par ordinateur (CAO)
Computer-Aided Manufacturing (CAM)	fabrication assistée par ordinateur (FAO)
direct manufacturing (DM)	fabrication directe (FD)
direct metal deposition (DMD®)	procédé DMD®
direct metal laser melting (DMLM)	procédé DMLM
direct metal laser re-melting (DMLR)	procédé DMLR
direct metal laser sintering (DMLS®)	procédé DMLS®
directed energy deposition (DED)	dépôt de matériau et fusion
design for manufacturing (DFM)	conception pour la fabrication
design for additive manufacturing (DFAM)	conception pour la fabrication additive
Electron Beam Freeform Fabrication (EBF3); Electron Beam Direct Manufacturing (EBDM)	procédé EBF3 ; procédé EBDM
Electron Beam Melting (EBM®)	fusion par faisceau d'électrons (EBM®) ; fusion locale de poudres par faisceau d'électrons (EBM®) ; procédé EBM®
Electron Beam Welding (EBW)	soudage par faisceau d'électrons
facet	facette (de maillage)
fused deposition modeling (FDM®)	dépôt de filament fondu ; dépôt de fil fondu ; modélisation par dépôt en fusion (FDM®) ; procédé FDM®
Initial Graphics Exchange Specification (IGES)	format IGES
laminated object manufacturing (LOM®)	procédé LOM®
Laser Engineered Net Shaping™ (LENS®)	procédé LENS®
laser melting systems	système de fusion laser
laser sintering (LS)	frittage laser (FL)
layer	couche
material extrusion	extrusion de matériau

material jetting	projection de matériau
metal 3D printing; metal 3DP	impression 3D des métaux
metal additive manufacturing; metal AM	fabrication additive à base de métaux
multi-material 3D printing	impression 3D multi-matériaux
powder bed fusion (PBF)	fusion sur lit de poudre
precision metal deposition (PMD™)	procédé PMD
Product Data Exchange Specification (PDES)	format PDES
prototype tooling	outillage prototypique
powder recovery system (PRS)	système de dépoudrage et récupération de la poudre
rapid prototyping (RP)	prototypage rapide
rapid tooling (RT)	outillage rapide
reverse engineering (RE)	rétroingénierie ; ingénierie inverse
selective laser melting (SLM)	fusion sélective par laser (FSL)
selective laser sintering (SLS®)	procédé SLS®
sheet lamination	stratification de matériau en feuille
Standard for the Exchange of Product Model Data (STEP)	format STEP
stereolithography (SL)	stéréolithographie (SL)
stereolithography apparatus (SLA®)	appareil de stéréolithographie (SLA®) ;
	machine de stéréolithographie (SLA®)
STL (STereoLithography)	format STL
subtractive manufacturing	fabrication par enlèvement de matière
Surface Free Forme (SFF)	surface gauche (ou complexe)
surface model	modèle surfacique
tool, tooling	outillage
vat photopolymerization	photopolymérisation en cuve

## **V. SITOGRAPHIE**

[www.3Dsystems.com](http://www.3Dsystems.com)  
<http://www.a3dm-magazine.fr>  
[www.poly-shape.com](http://www.poly-shape.com)  
<http://www.additiveverse.com>  
<http://www.sculpteo.com/>  
<http://www.schiltz.be>  
[www.rtejournal.de](http://www.rtejournal.de)  
[www.Jwell.fr](http://www.Jwell.fr)  
[www.modelab.fr](http://www.modelab.fr)  
[www.santédumonde.fr](http://www.santédumonde.fr)  
[www.mgxbymaterialise.com](http://www.mgxbymaterialise.com)  
<http://cubify.com/products/guitars/>  
<http://www.3dprinter.net/emerging-objects-has-big-plans-for-big-bold-prints>  
<http://www.zcorp.com>  
[www.avenue-informatique.fr](http://www.avenue-informatique.fr)  
[www.dma-laser.fr](http://www.dma-laser.fr)  
<http://www.erpro.fr>  
<http://prismadd.com>  
[www.mcad.com](http://www.mcad.com)  
<http://www.stratoconception.com>  
<http://www.proto.fr>  
[www.group-allio.com](http://www.group-allio.com)  
<http://www.boeing.com>  
[www.expansion.lexpress.fr](http://www.expansion.lexpress.fr)  
<http://www.huffingtonpost.fr/>  
<http://www.cmap.polytechnique.fr>  
<http://fr.lookcloseseefar.com/impression-3d-les-differentes-technologies/>

## **VI. BIBLIOGRAPHIE**

- Le Bourhis, F. (2014) *Modélisation de la performance environnementale des procédés de fabrication par ajout de matière. Application à la projection de poudres métalliques*.
- Calignano, F. (2014) ‘Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting’, *Materials and Design*, 64, pp. 203–213. doi: 10.1016/j.matdes.2014.07.043.
- Dilberoglu, U. M. *et al.* (2017) ‘The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0’, *Procedia Manufacturing*, 11(June), pp. 545–554. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.148.
- Kruth, J. P. *et al.* (2004) ‘Selective laser melting of iron-based powder’, *J. Mater. Process. Technol.*, 149(1–3), pp. 616–622. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.051.
- Liu, Y., Yang, Y. and Wang, D. (2016) ‘A study on the residual stress during selective laser melting (SLM) of metallic powder’, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(1–4), pp. 647–656. doi: 10.1007/s00170-016-8466-y.
- Pandey, P. M., Reddy, N. V. and Dhande, S. G. (2007) ‘Part deposition orientation studies in layered manufacturing’, *Journal of materials processing technology*, 185(1), pp. 125–131. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.03.120.
- Thompson, M. K. *et al.* (2016) ‘Design for additive manufacturing: trends, opportunities, considerations, and constraints’, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65, pp. 737–760. doi: 10.1016/j.cirp.2016.05.004.
- Tomlin, M. and Meyer, J. (2011) ‘Topology optimization of an additive layer manufactured (ALM)

aerospace part', in *Proceeding of the 7th Altair CAE Technology Conference*, pp. 1–9.

Vayre, B. (2014) *Conception pour la fabrication additive , application à la technologie EBM*. Thèse. Université de Grenoble.

Wang, D. *et al.* (2013) 'Study on the designing rules and processability of porous structure based on selective laser melting (SLM)', *Journal of Materials Processing Technology*, 213(10), pp. 1734–1742. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.05.001.

Berchon M. et Bertier L., « L'impression 3D », Serial makers, Eyrolles, 2013, EAN13 : 782212135220.

Hascoët, JY, Mognol, P, 2014. *Du prototypage rapide à la fabrication directe*. Cours, ENS Nantes.

Le Ber, R, Blin, M, 2014, *L'impression 3D, Enjeux et perspective*. DIRECCTE Centre, en partenariat avec CCI Centre. <http://www.centre.direccte.gouv.fr/L-impression-3D-etat-des-lieux-et>

Bernard, A, 2014. *Impression 3D, de l'idée au produit*. Visiatome, Marcoule, 17 avril 2014