

INTRODUCTION A LA FABRICATION ADDITIVE

Les procédés

École d'Ingénieurs de l'Université de Toulon

A decorative graphic at the bottom of the page showing a blue wave on the left transitioning into a molecular or network structure of blue lines and dots on the right.

Myriam ORQUERA
SEATECH
École d'Ingénieurs de Toulon
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

I.	Qu'est-ce que la Fabrication Additive (FA) ?	4
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
II.	Procédés de FA métallique	6
1)	Fusion sur lit de poudre (PBF : Powder Bed Fusion)	7
2)	Dépôt de matière sous énergie concentrée (DED Direct Energy Deposition)	12
3)	Extrusion de matière de type BMD (Bound Metal Deposition)	16
4)	Projection de liant (MBJ Metal Binder Jetting)	18
5)	Stratification de couches (LOM Laminated Object Manufacturing)	19
6)	Comparatif entre les technologies L-PBF/ EB-PBF/WAAM	21
III.	Procédés de FA plastique et autres	22
1)	Fusion LASER lit de poudre (SLS Selective Laser Sintering)	22
2)	Extrusion de matière (Fdm Fused Deposition Modeling)	22
3)	Projection de liant (BJ Binder Jetting)	24
4)	Projection de matière (MJM MultiJet Modeling)	25
5)	Stratification de couches	26
6)	Photo polymérisation en cuve (SLA Stéréolithographie)	27
7)	Comparatif SLA-SLS-Fdm	29
IV.	Quel procédé utiliser en fonction de quel besoin ?	30
V.	Les secteurs et domaines exploitant la FA	30
VI.	LEXIQUE ANGLAIS FRANÇAIS	31
VII.	SITOGRAFIE	33
VIII.	BIBLIOGRAPHIE	33

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.

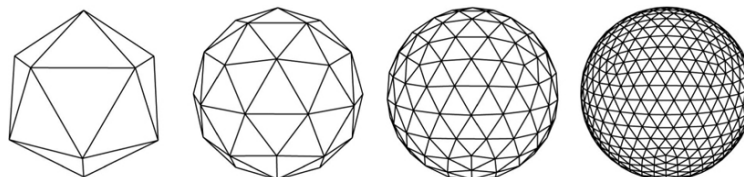


Figure 1 : Influence de la finesse de la facettisation sur la géométrie

- 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).

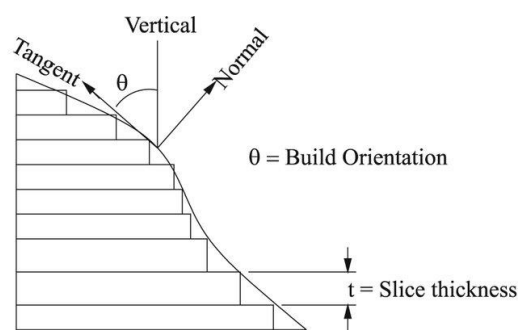


Figure 2 : Staircase effect (l'effet escalier) du procédé de dépôt de couche (Pandey, Reddy and Dhande, 2007)

- 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)
 - ...

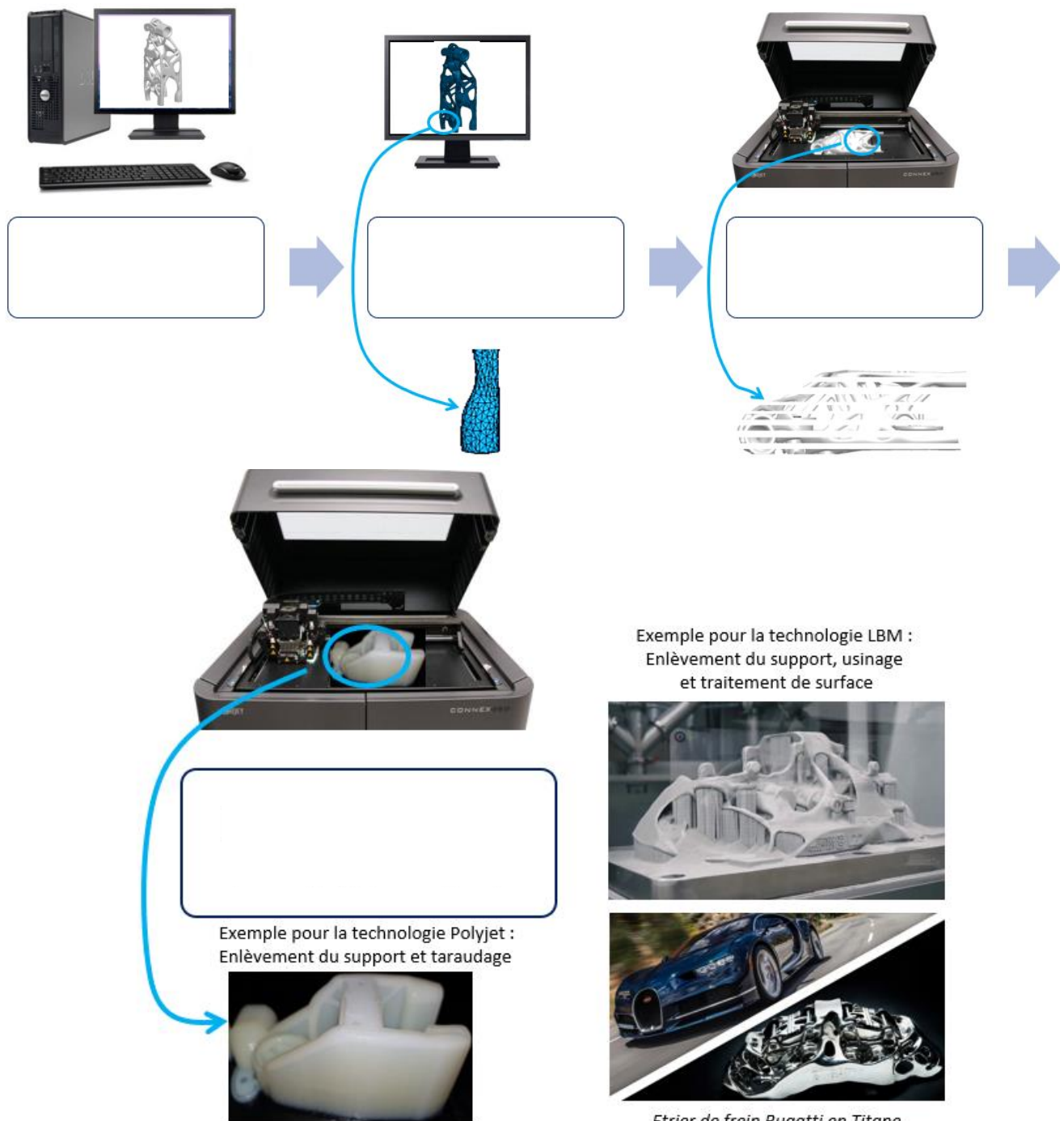


Figure 3 : Processus de la fabrication additive

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
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 2PP	DOD MJ NPJ	BJ	L-PBF EB-PBF SLS MJF	AW-DED (WAAM) LP-DED (CLAD)	LOM UC

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

II. Procédés de FA métallique

Les procédés métalliques sont plus ou moins matures comme le montre la figure suivante.

Metal AM Maturity Index 2021

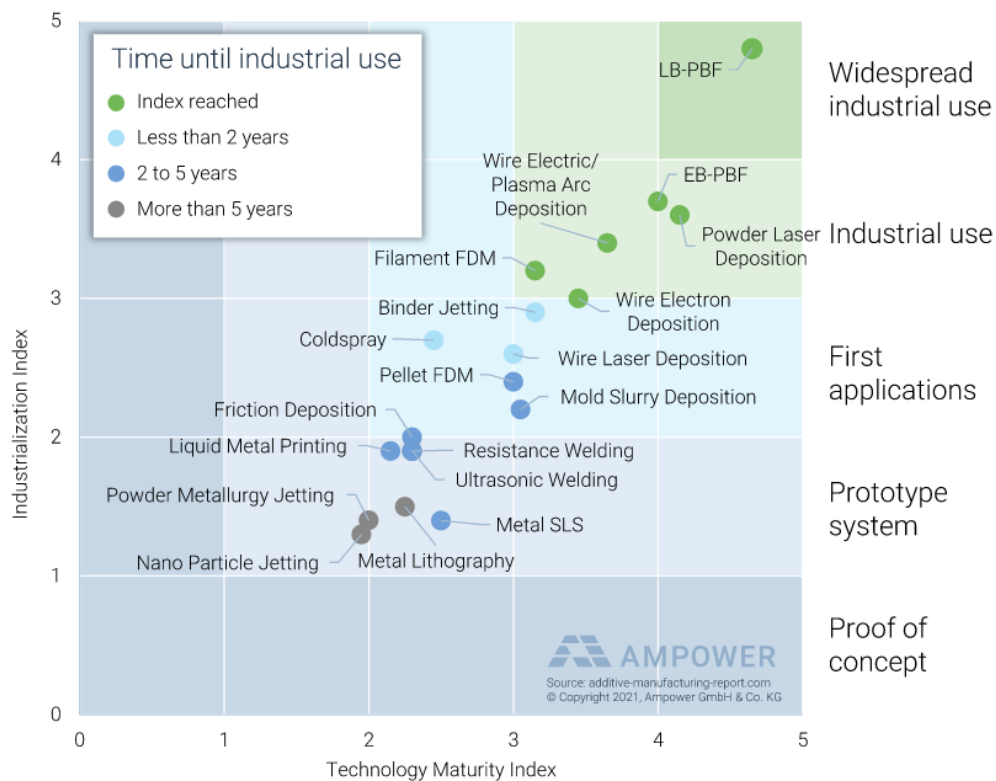


Figure 5 : Maturité des procédés de FA en 2021. Source : additive-manufacturing-report.com/

Dans la suite de ce cours, seuls les procédés « éprouvés » dans l’industrie seront détaillés. On récence actuellement 5 procédés de FA métallique parmi les 7 présentés dans la Figure 4.

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

Les différentes appellations:

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

(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 μ m) y est déposée et aplanie grâce au racleur. Un laser à forte puissance (Laser à CO₂ 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...

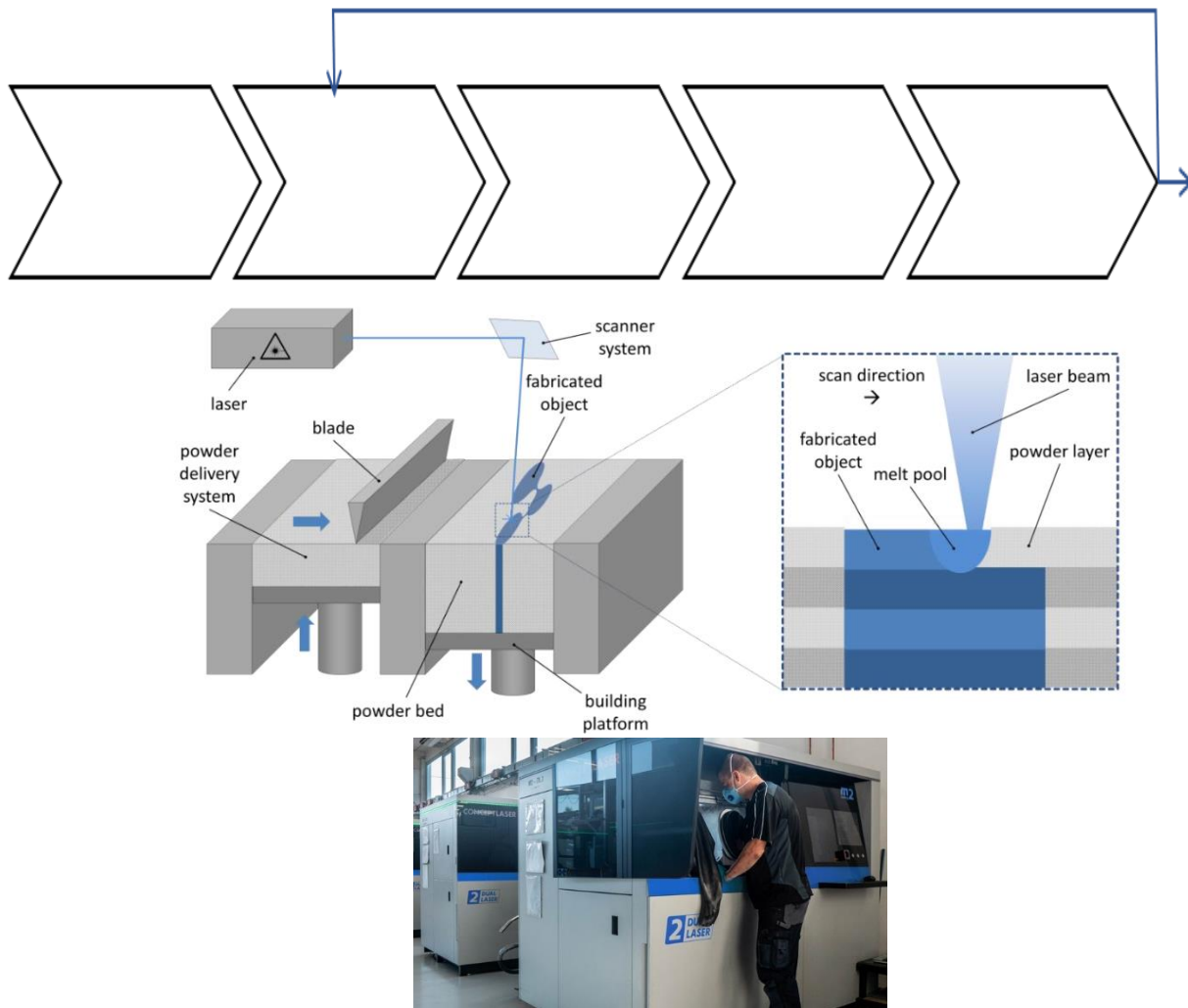


Figure 6 : Principe de la technologie L-PBF (Leitz et al., 2017), exemple d'une machine L- PBF

(ii) Problématique de cette technologie

☞ Les scories

Définition :

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.

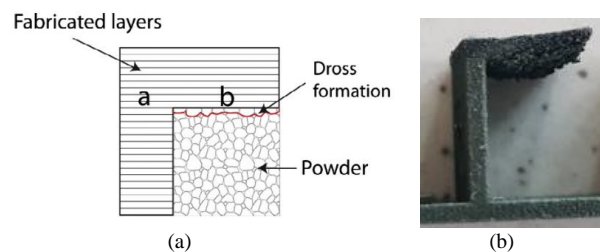


Figure 7. (a) Scories sur surface en porte à faux pour LBM (Calignano, 2014); (b) Mise en évidence du phénomène de scorie lors d'impression de porte à faux (Imprimé sous LBM par MAQ-3D)

☞ Phénomène de gauchissement (warping)

Définition :

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.

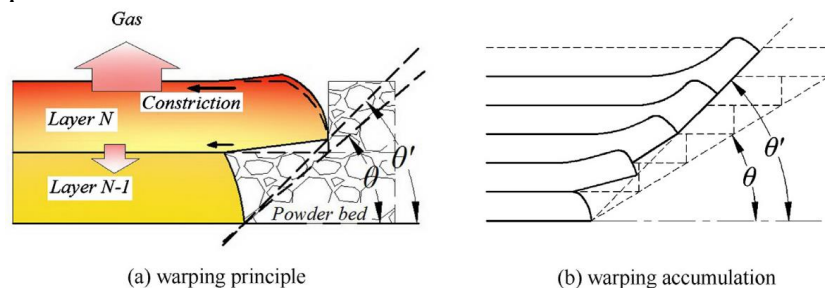


Figure 8. Déformation plastique des surfaces en porte à faux dû au gauchissement (Wang *et al.*, 2013)

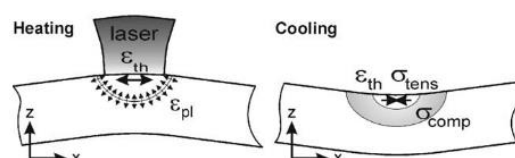


Figure 9. Gauchissement de surface (Kruth *et al.*, 2004)

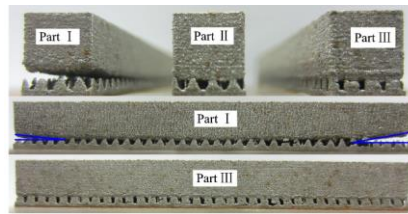


Figure 10. Impact du support sur le gauchissement (Liu, Yang and Wang, 2016)

☞ 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'usinages.



Figure 11. Supports nécessaires pour la fabrication

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

(iii) Exemples d'applications

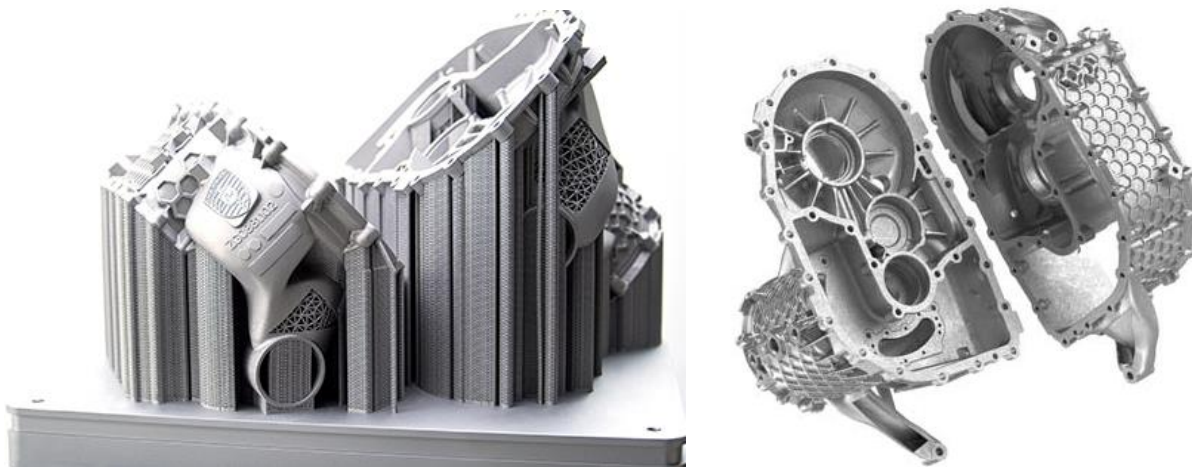


Figure 12. Carter de transmission électrique pour une Porsche, fabriqué par L-PBF, sur le plateau d'impression à gauche et post-traité à droite. Source : www.slm-pushing-the-limits.com/

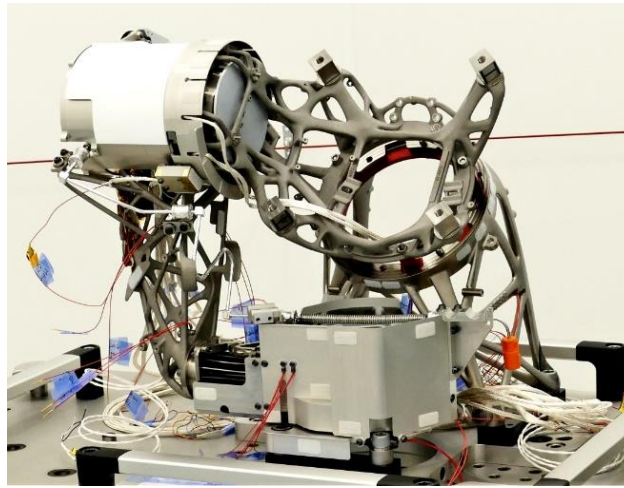


Figure 13. Support de mécanisme de propulsion électrique (ETHM) de satellite, thalesgroup.com

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

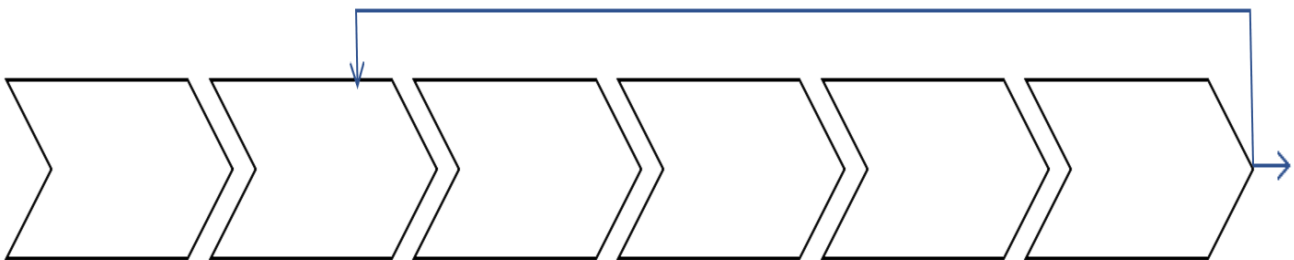
L'appellation la plus courante est EBM (Electron Beam Melting) ou encore EB-PBF (Electron Beam Powder Bed Fusion).

(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 μ 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.



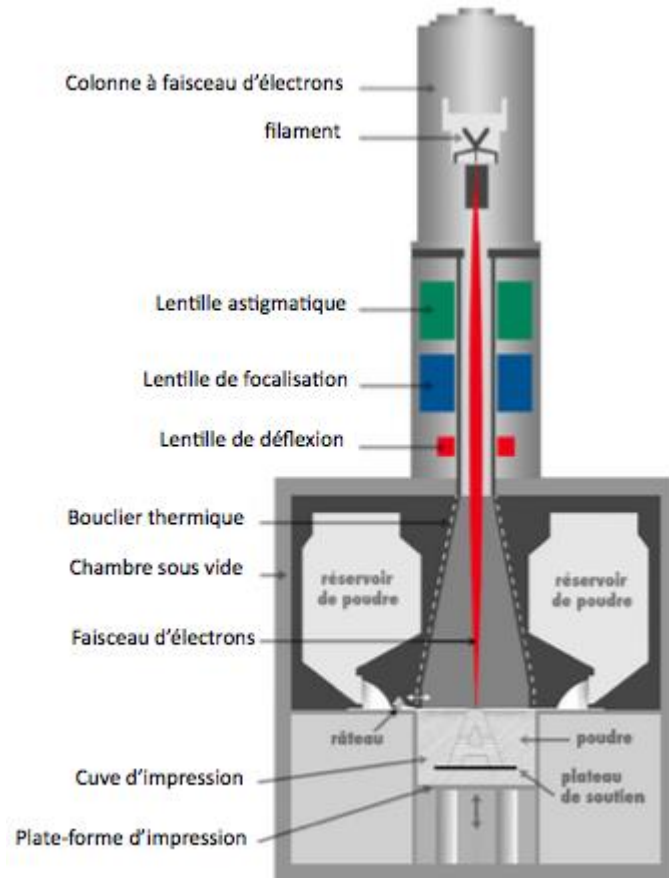


Figure 14 : Schéma de principe de l'EBM

(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'EB-PBF, 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. Pour l'EB-PBF, les supports s'enlèvent aisément à la main.

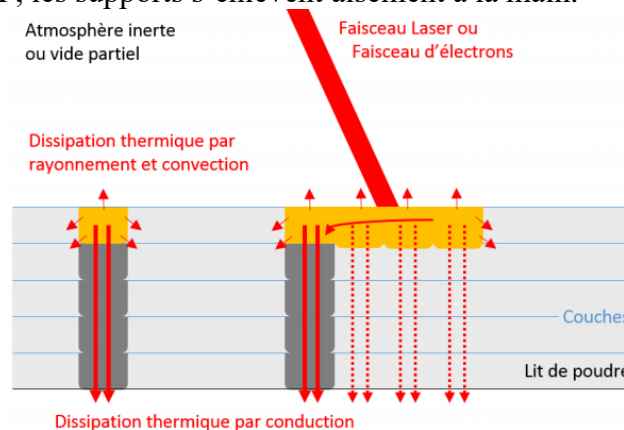


Figure 15 : Exemple de dissipation thermique pour des formes à éviter. Source (Vayre, 2014)

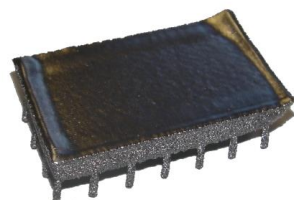


Figure 16 : Déformations géométriques à cause du trop faible nombre de supports (structures cylindriques sous la pièce) (Vayre, 2014)

(iii) Exemple d'application

Figure 17 : Corps de refroidisseur réalisé par EBM

c) Avantages/Inconvénients

☞ Avantages du L-PBF par rapport à l'EB-PBF

- 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'EB-PBF par rapport au L-PBF

- 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 (DED Direct Energy Deposition)

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 18 : 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.

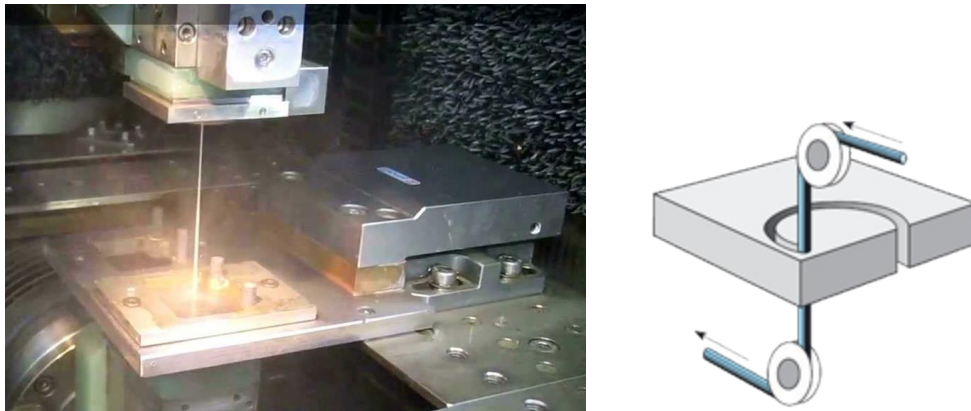


Figure 19 : Photo du procédé (source : Prototec), image du principe (source : <http://www.schiltz.be>)

(ii) Exemple d'application



Figure 20 : 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.

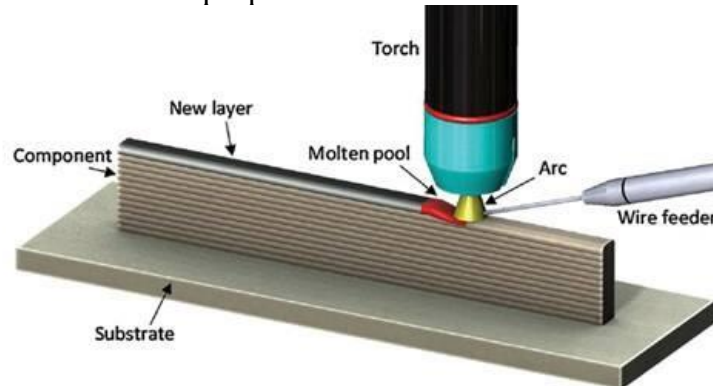


Figure 21 : Image du principe (source : Dassault Systèmes)

(i) Problématique de cette technologie

Lors de la fabrication, le fort apport énergétique pour former le bain de fusion du fil génère des gradients thermiques assez conséquents qui conduisent à des déformations et des contraintes résiduelles. Cela entraîne un gauchissement des pièces.



Figure 22 : Problème de gauchissement pour le WAAM (source : metalblog.ctif.com)

(ii) Exemple d'application

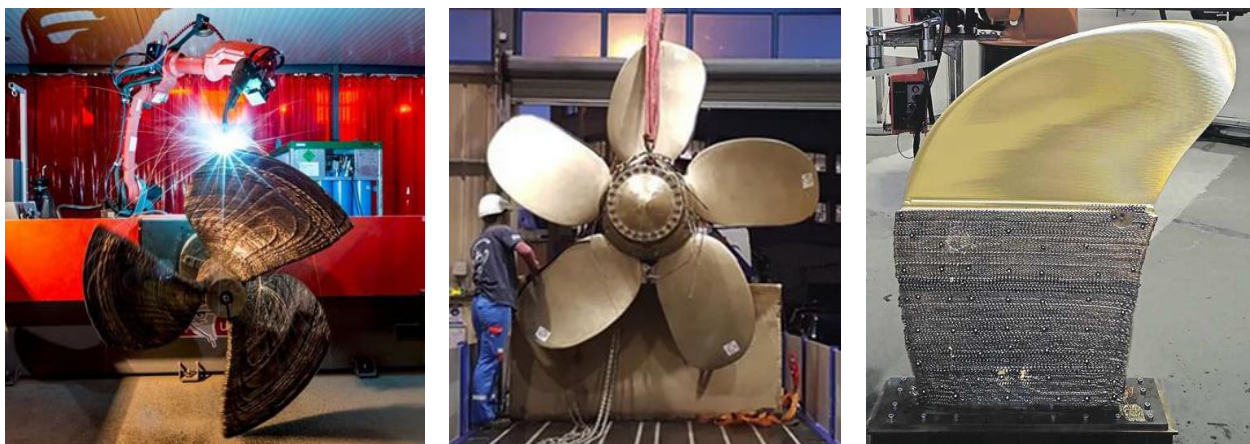


Figure 23 : A gauche, une hélice en cours de fabrication ; Au milieu, hélice installée en 2021 sur un bateau de la marine nationale ; A droite, hélice brute de fabrication en bas et usinée sur la partie haute.



Figure 24 : Pont en acier imprimé par WAAM par la société MX3D, installé dans la ville d'Amsterdam



Figure 25 : une cuve de pressurisation de 1 m de haut destinée à l'exploration spatiale, fabriquée en 2017 à l'université de Cranfield pour Thales Alenia Space. La pièce a permis un gain de 80% de matière, 40% de coût et de réduire les délais de 65 % par rapport à l'ancienne méthode de fabrication. (Courtesy Cranfield University and Thales Alenia Space)

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 mm³) 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

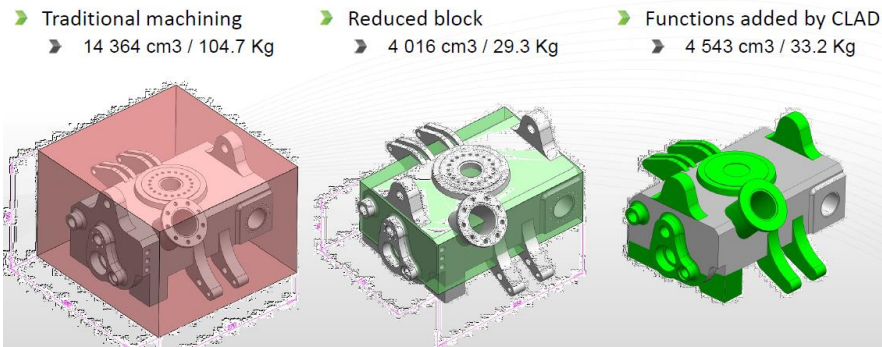


Figure 26 : Rajout de fonctions sur un bloc métallique (Frechard 2015)

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.

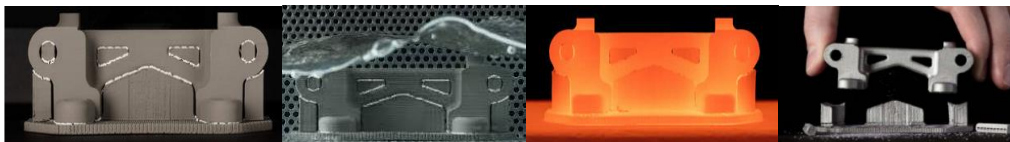
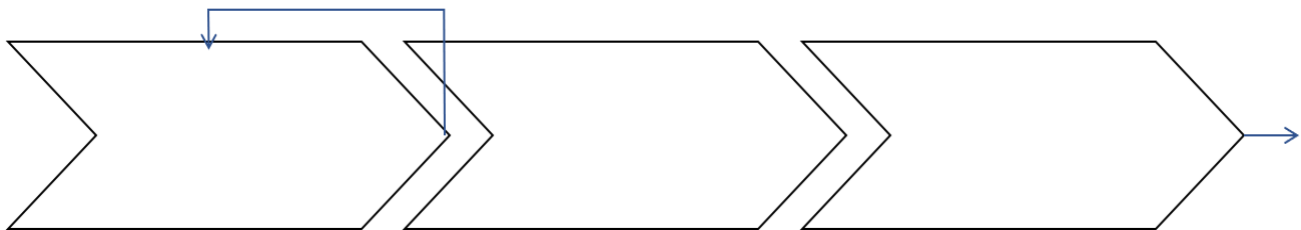


Figure 27 : Etapes de fabrication du BMD. De gauche à droite, la pièce imprimée appelée pièce verte, phase de déliantage, puis la phase de frittage, élèvement du support et à droite la pièce finit

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

b) Problématique de la technologie

-

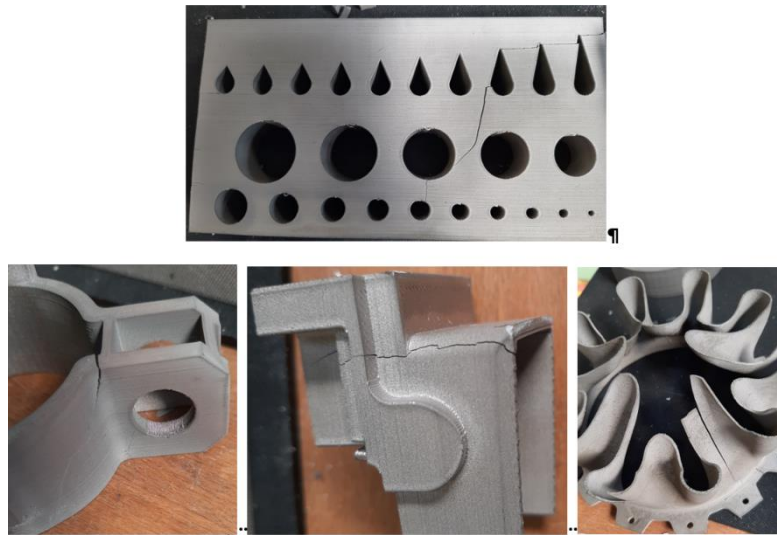


Figure 28 : Divers exemple de pièces fissurées suite au frittage

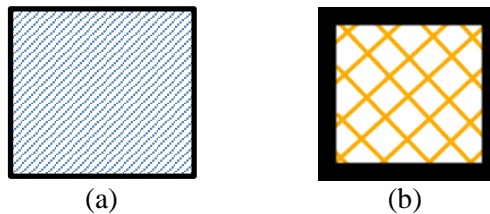


Figure 29 : (a) Pièce massive dessinée en BE ; (b) pièce réalisée par la machine BMD

c) Exemple d'application



Figure 30 : Pince fonctionnelle réalisée par BMD. Source : objective3d.com.au

d) Avantages/Inconvénients

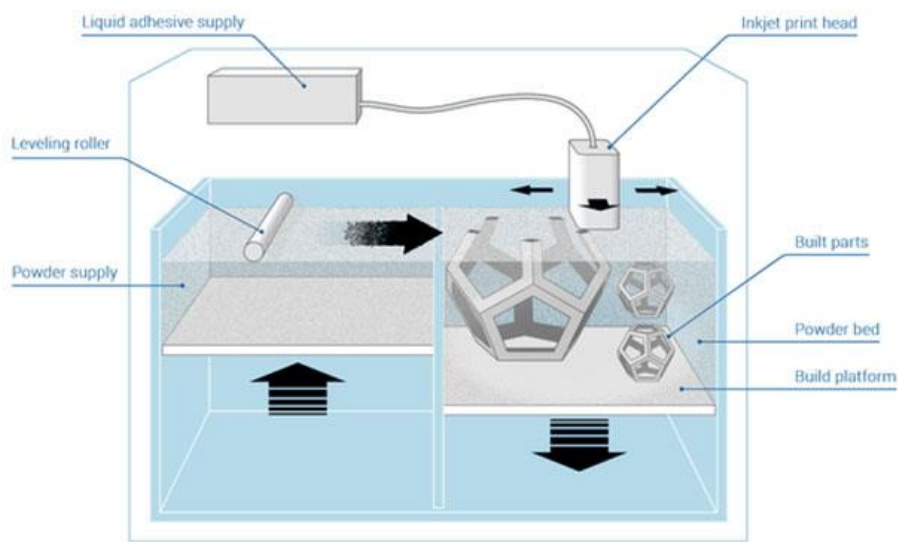
- + L'avantage majeur de la BMD face au L-PBF est le fait que l'on ne travaille pas directement avec les poudres de métal : en effet, celles-ci sont enfermées dans le liant.
- + Le coût est également un avantage non négociable : l'équipement coûte en moyenne 3x moins cher qu'une solution de frittage laser.
- + Il est possible de post-traiter les pièces afin d'arriver à un résultat satisfaisant.
- 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.
- Les pièces massives sont d'office remplies d'un treillis maîtrisé seulement par le soft de la machine.
- Le retrait matière de la phase de frittage (environ de 20%) n'est pas toujours bien maîtrisé.

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.



Jusqu'à la dernière couche

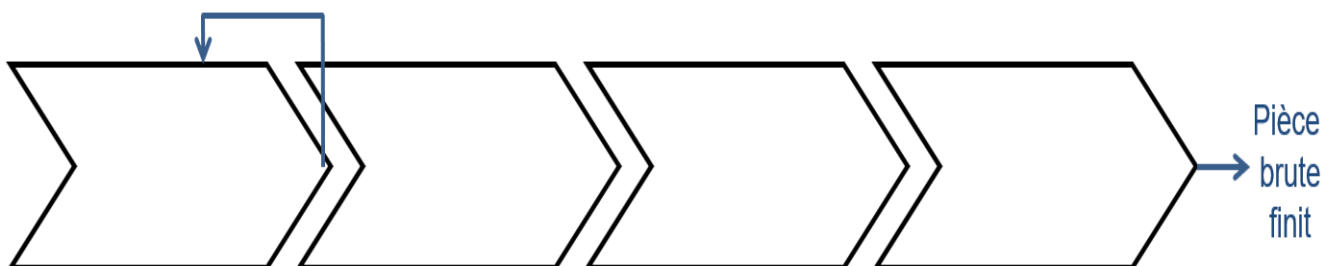


Figure 31 : Principe du processus. Source : 3dnatives.com

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 (poudre auto-portante)
- Pas de support
- Grande finition

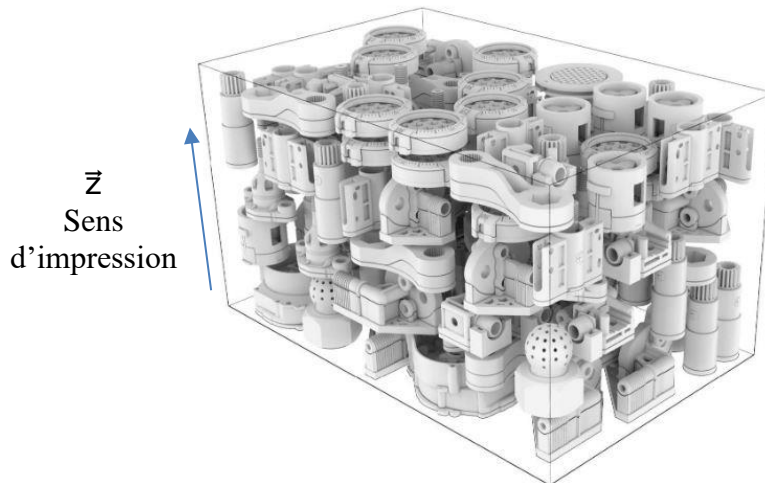


Figure 32 : Des centaines de pièces peuvent être imprimées par lots en même temps. Le logiciel de l'imprimante aide à imbriquer les pièces dans le volume total de la capacité de l'imprimante. (Source : Desktop Metal)

Inconvénients :

- Dimensions faibles
- Toutes les formes des pièces ne sont pas possibles
- Retrait des surfaces lors du frittage (de 20 à 40%)



Figure 33 : 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)
SHL Sheet Lamination

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.

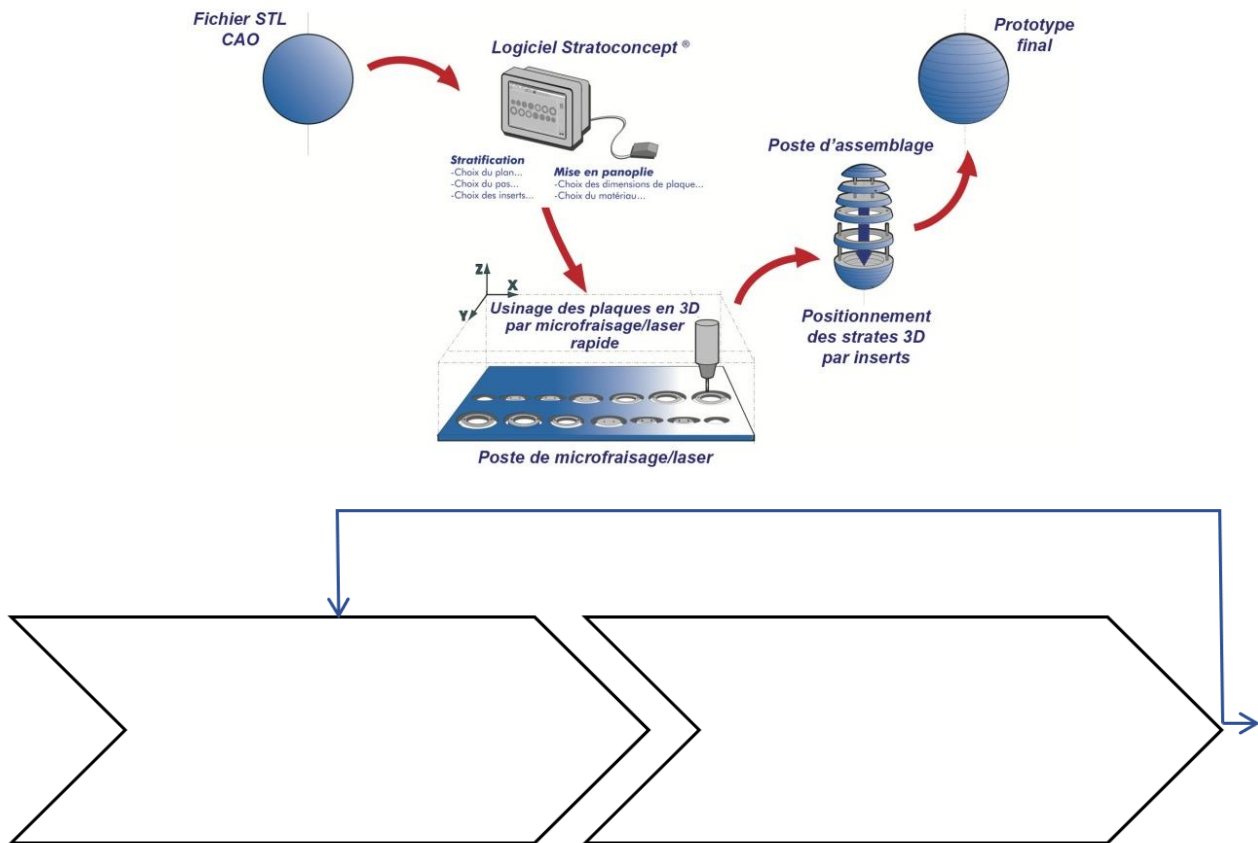


Figure 34 : Principe du procédé. Source <http://www.stratoconception.com>

c) Avantages/Inconvénients

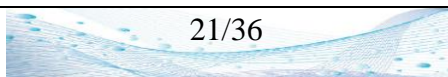
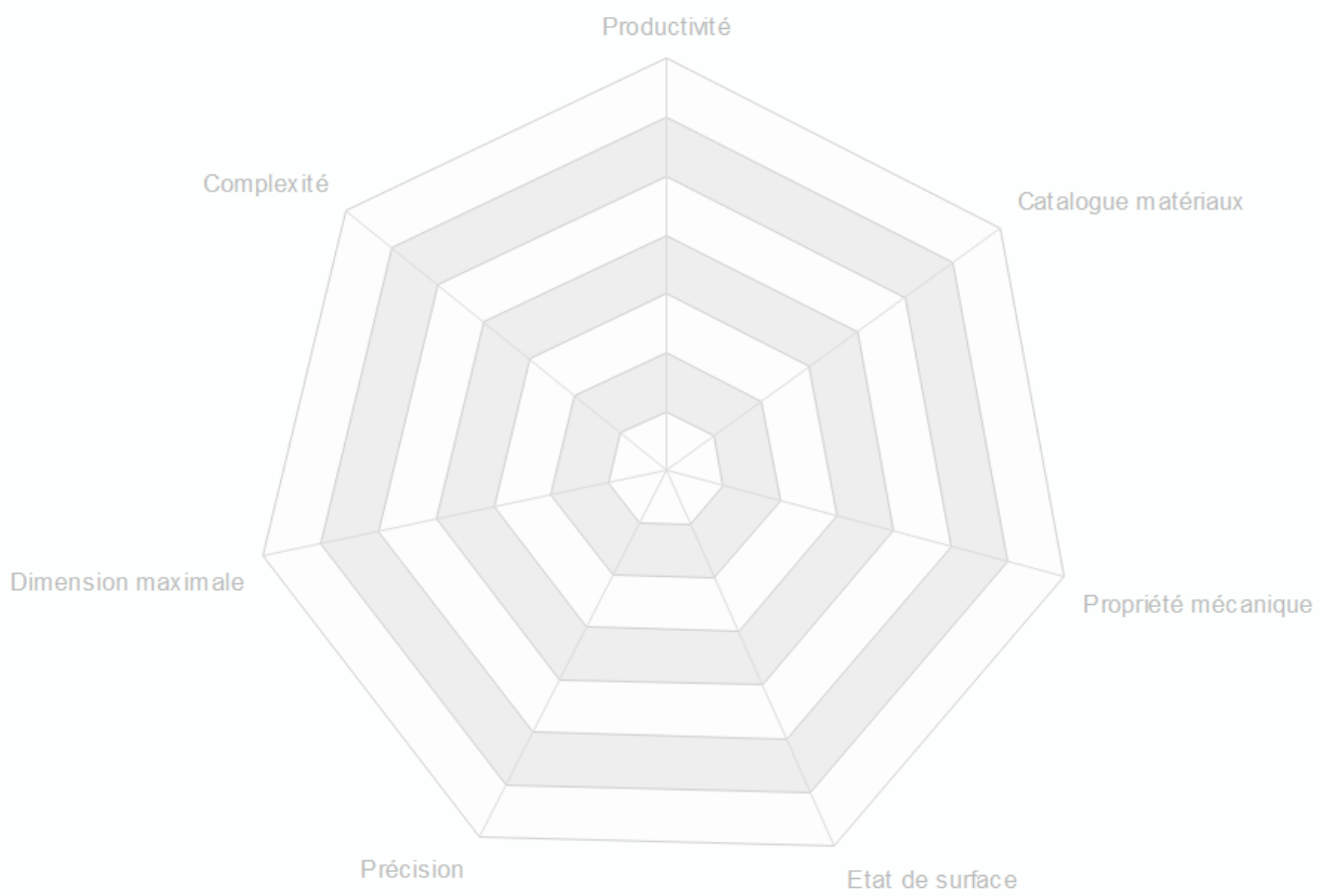
- + Grandes pièces,
- + Matériaux très divers
- + Coût machine et de production très raisonnable
- + Facilité d'approvisionnement matière
- + Temps de réalisation des pièces réduit
- Besoin de finition (joints de plaques)
- La mise en place de strates fastidieuse.

d) Exemples d'applications



Figure 35 : Moule pour injection soufflage « Végétal Minéral Water ». Source <http://www.stratoconception.com>

6) Comparatif entre les technologies L-PBF/ EB-PBF/WAAM



III. Procédés de FA polymère et autres

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, aplanie 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)...

Définition de frittage :

Définition de Fusion :

b) Avantages/Inconvénients

Les pièces fabriquées par SLS présentent des surfaces 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 36 : Vêtement imprimé en SLS. Source : news.softpedia.com/

2) Extrusion de matière (FDM Fused Deposition Modeling)

a) Les différentes appellations

FDM (Fused Deposition Modeling), FFF (FreeForm Fabrication), 3D Print, Mex pour Material Extrusion

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.

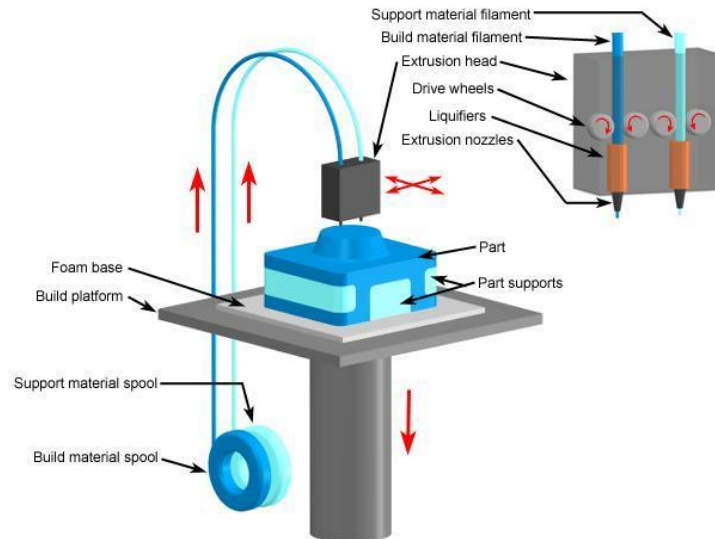


Figure 37 : Principe de l'extrusion de matière. Source : 3Dnatives.com

c) Problématiques de la technologie

-
-



Figure 38 : 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 39 : Monture de lunette. Source <http://www.erpro.fr> ; Carter de drone

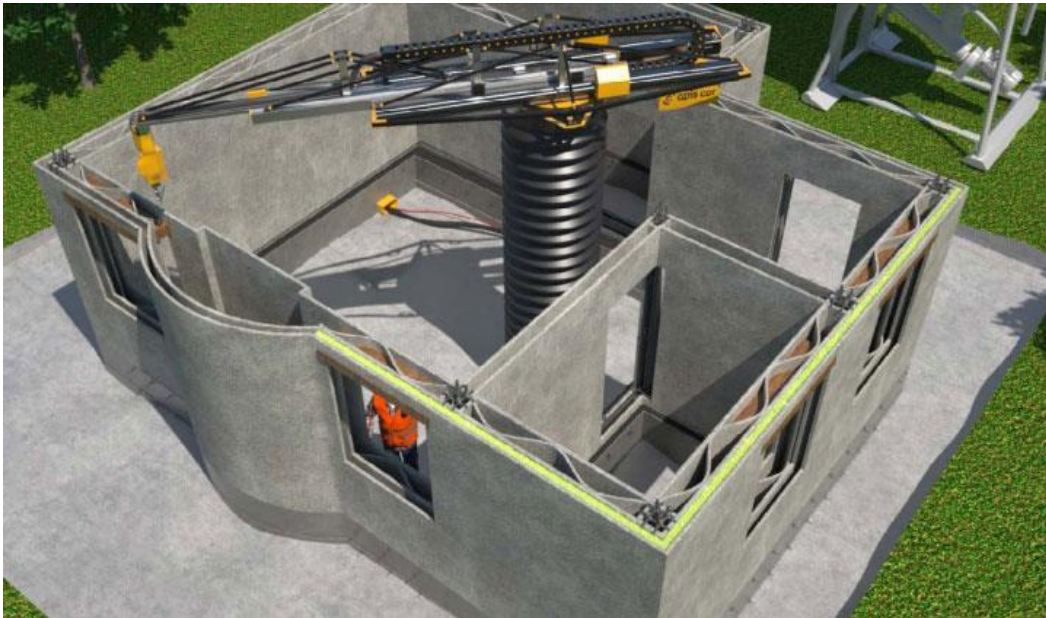


Figure 40 : Construction d'une maison en béton. Source : www.lesimprimantes3d.fr



Figure 41 : Impression de nourriture, ici une pâte de la marque Barilla. Source : blurhapsody.com/

3) Projection de liant (BJ Binder Jetting)

a) Appellations

BJ ou BJT

b) 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.

c) 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

d) Exemples d'applications

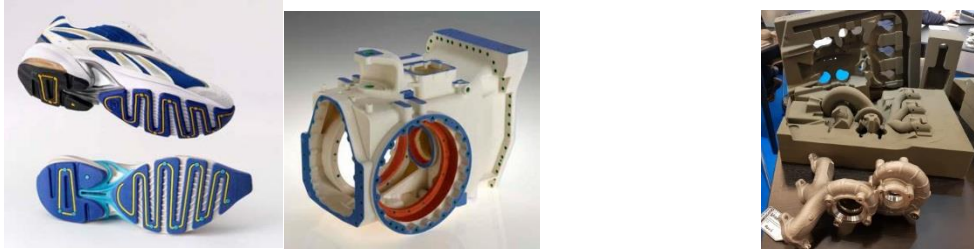


Figure 42 : Prototype de chaussure et de carter Source : <http://www.zcorp.com> ;

Moule et noyaux

4) Projection de matière (MJM MultiJet Modeling)

a) Les différentes appellations

PolyJet PJ, 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.

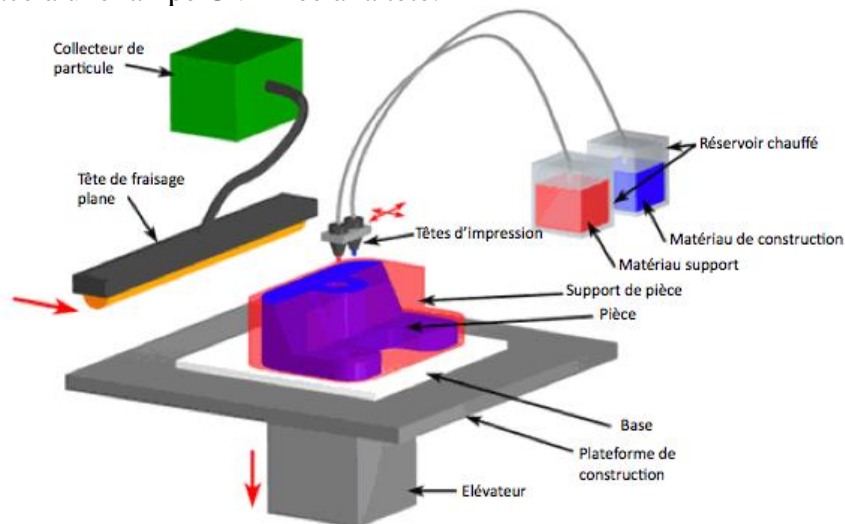


Figure 43 : Principe de la MJM. Source <http://prismadd.com>

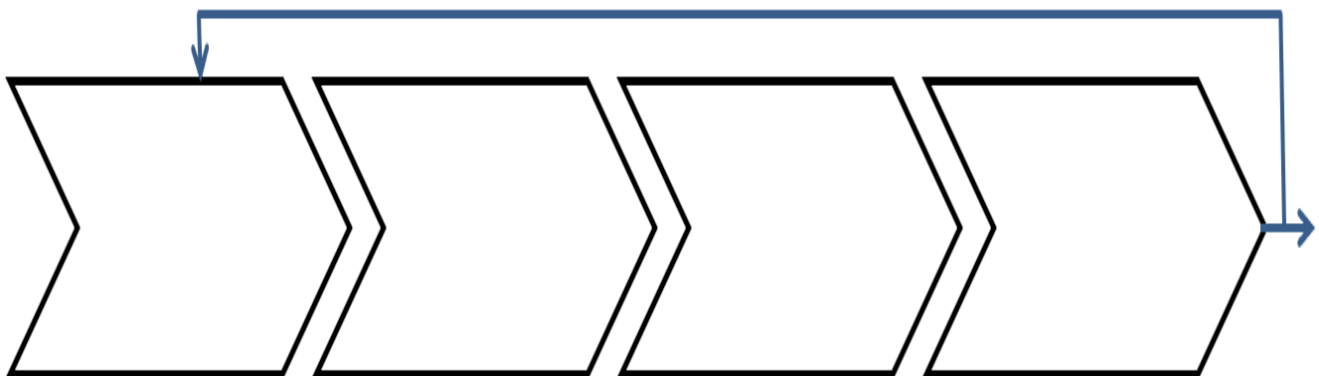


Figure 44 : Etapes de fabrication de la projection de matière

c) Problématiques de la technologie

-
-



Figure 45 : Exemple d'une clef à molette sans puis avec le support partiellement enlevé à la main

•

d) 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

e) Exemples d'applications



Figure 46 : Casque de vélo. Source mcad.com A droite : Phare

5) Stratification de couches

Identique au procédé vu dans le chapitre métallique.



Figure 47 : Emballage Pack'nStrat. Source <http://www.stratoconception.com>

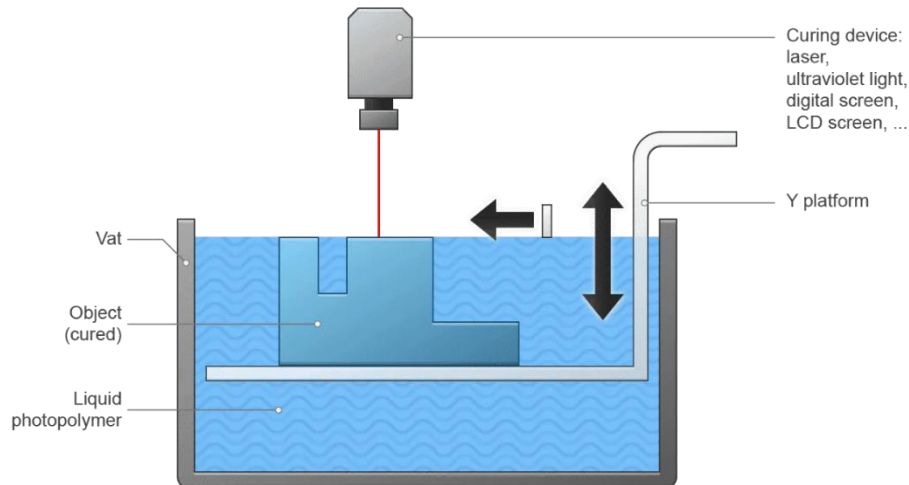
6) Photo polymérisation en cuve (SLA Stéréolithographie)

a) Les différentes appellations

- Stéréolithographie, SL ou SLA
- VAT
- 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.



2018 © Dassault Systèmes

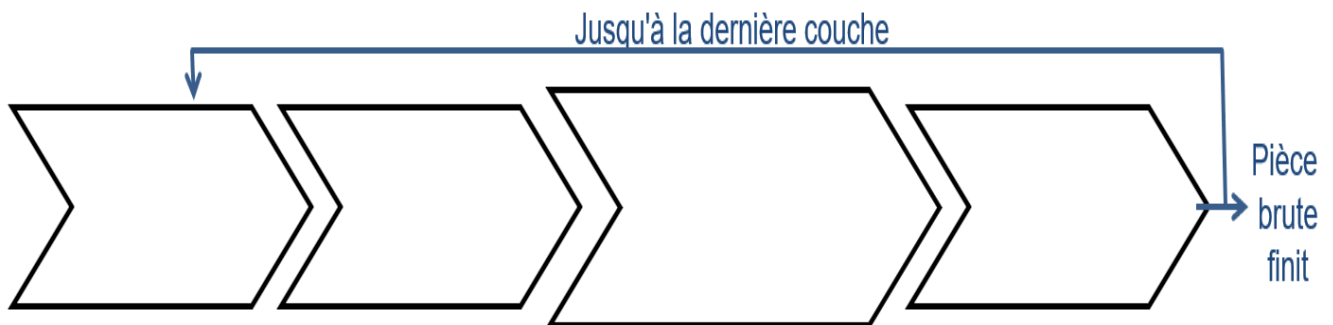


Figure 48 : Principe du procédé. Source : <http://www.proto.fr>

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.

c) Problématiques de la technologie

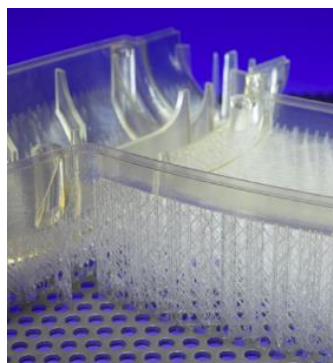


Figure 49 : Pièce réalisée par Stéréolithographie avec le support (source : www.rtejournal.de)

d) 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

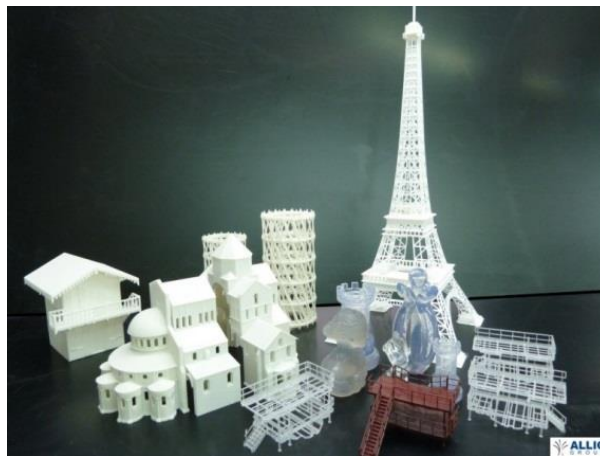
e) Exemples d'applications

Figure 50 : Diverses réalisations. Source : group-allio.com



Figure 51 : Optique de voiture

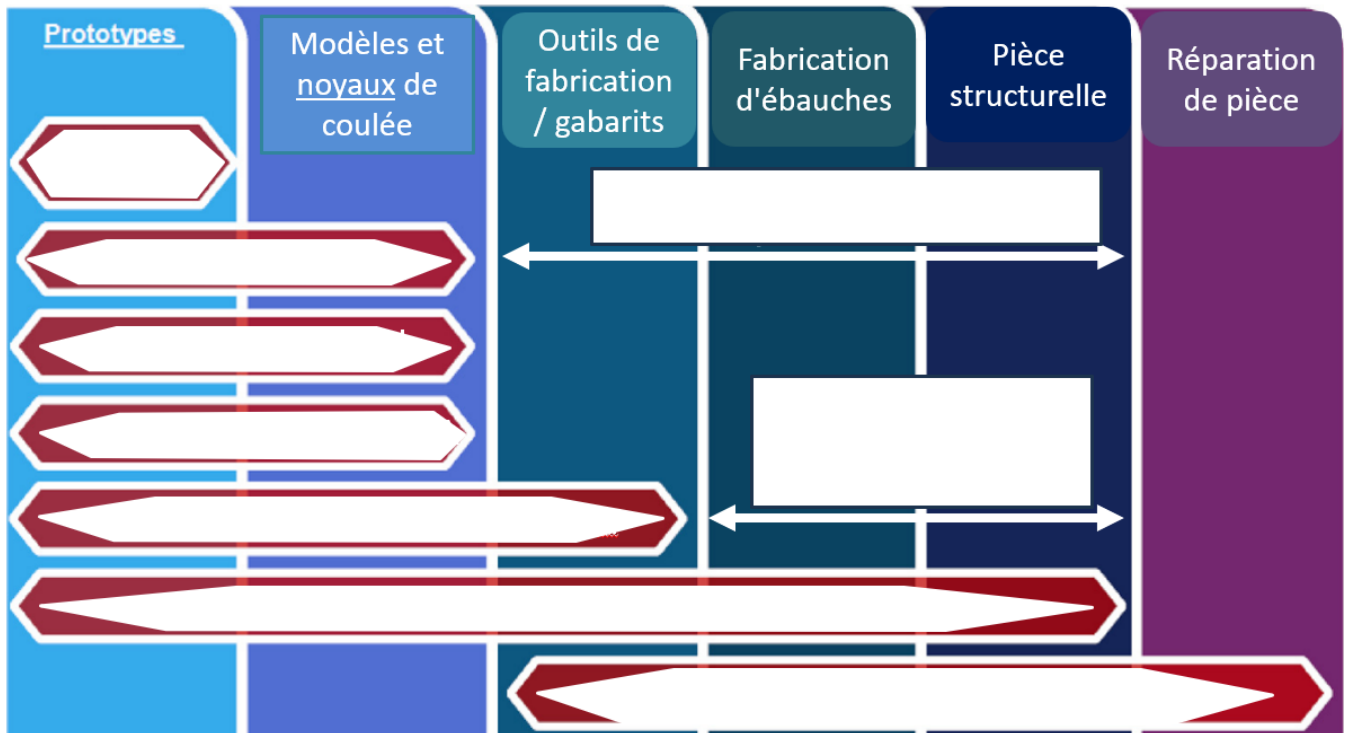
7) Comparatif SLA-SLS-FdM

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)
Résolution	★★☆☆☆	★★★★★	★★★★☆
Précision	★★★★☆	★★★★★	★★★★★
Finitions	★★☆☆☆	★★★★★	★★★★☆
Volume de production	★★★★☆	★★★★☆	★★★★★
Complexité du design	★★☆☆☆	★★★★☆	★★★★★
Simplicité d'utilisation	★★★★★	★★★★★	★★★★☆
Avantages	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
Inconvénients	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
Applications	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
Volume d'impression	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)
Matériaux	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.
Formation nécessaire	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.
Prérequis pour l'environnement de travail	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.
Équipement supplémentaire	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.

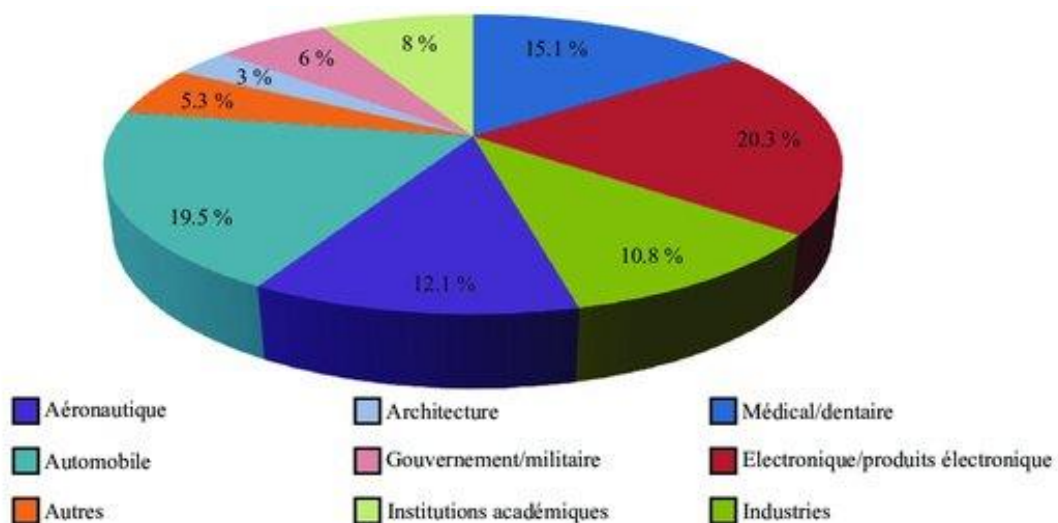
Tableau comparatif. Source : <https://formlabs.com>

IV. Quel procédé utiliser en fonction de quel besoin ?



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

V. Les secteurs et domaines exploitant la FA



Part relative d'utilisation de la fabrication additive par domaine [Wohlers2013]

VI. LEXIQUE ANGLAIS FRANCAIS

English	Français
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);	procédé EBF3 ; procédé EBDM
Electron Beam Direct Manufacturing (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

VII.SITOGRAPHIE

www.3Dsystems.com
<http://www.a3dm-magazine.fr>
www.poly-shape.com
<http://www.additiveverse.com>
<http://www.sculpteo.com/>
<http://www.schiltz.be>
www.rtejournal.de
www.Jwell.fr
www.modelab.fr
www.santédumonde.fr
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
www.dma-laser.fr
<http://www.erpro.fr>
<http://prismadd.com>
www.mcad.com
<http://www.stratoconception.com>
<http://www.proto.fr>
www.group-allio.com
<http://www.boeing.com>
www.expansion.lexpress.fr
<http://www.huffingtonpost.fr/>
<http://www.cmap.polytechnique.fr>
<http://fr.lookcloseseefar.com/impression-3d-les-differentes-technologies/>

VIII. 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 Dhonde, 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



Polycopié
INTRODUCTION A LA
FABRICATION
ADDITIVE

Les procédés



Myriam ORQUERA
SEATECH
École d'Ingénieurs de Toulon
myriam.orquera@univ-tln.fr