

LE PROTOTYPAGE RAPIDE EN MÉCANIQUE

Date : 25 juillet 2022

Auteur(s) : Sébastien Charles

Copyright : S. Charles, UVSQ - IUT de Mantes en Yvelines

Licence : CC 4.0 BY-NC-SA [<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.fr>] + licence commerciale ET-LIOS [<https://et-lios.s-mart.fr/licencecommerciale/>]

Table des matières

Introduction	3
1. Présentation générale de l'impression 3D	4
2. Les secteurs et acteurs sur le marché des imprimantes 3D	6
3. Les technologies de l'impression 3D	12
3.1. Introduction	12
3.2. La photopolymérisation	13
3.3. L'extrusion	16
3.4. La projection	18
3.5. La fusion de poudre	20
3.6. La stratoconception	25
3.7. L'impression 4D	26
3.8. Comparaison des procédés	28
4. Les matériaux utilisés en impression 3D	29
4.1. Introduction	29
4.2. Les plastiques	29
4.3. Les métaux utilisés en SLS, EBM et DED	31
4.4. Les céramiques	32
4.5. Les matériaux organiques	32
4.6. Les pigments	33
4.7. Les matériaux hybrides	33
4.8. Compatibilité entre les technologies d'impression 3D et les matériaux	33
4.9. Comment choisir un matériau ?	34
5. Bonnes pratiques de l'impression 3D	36
6. La découpe laser	39
7. Les scanners 3D	43
Glossaire	46

Introduction

La fabrication additive, désignée plus communément par les termes « impression 3D », prend une place grandissante dans les process de production industrielle. Cette technologie de production est notamment appréciée pour la rapidité avec laquelle on obtient un objet fonctionnel et pour la simplicité de gestion et de la disponibilité des stocks des matières premières.

1. Présentation générale de l'impression 3D

Il existe deux grandes familles de production mécanique : la fabrication soustractive et additive.



Fabrication soustractive

La fabrication soustractive consiste à retirer de la matière comme par exemple avec le tournage et le fraisage.



Fabrication additive

La fabrication additive consiste à ajouter de la matière (impression 3D, injection plastique, rotomoulage, etc.). En ce qui concerne l'impression 3D, l'ajout de matière est très souvent réalisée en couche par couche d'épaisseurs constantes.

L'impression 3D vient compléter les procédés de productions traditionnels que sont l'usinage, le moulage, le formage ou encore l'assemblage (soudage, collage, clipsage, clinchage, etc.).

Dans le domaine de l'impression 3D, il existe différentes techniques d'ajout de matière dont le choix dépend des propriétés physiques de l'objet produit (mécaniques, chimiques, magnétiques, etc.) et de ses contraintes géométriques et dimensionnelles.

L'impression 3D est également appelée impression tridimensionnelle, fabrication rapide, fabrication additive (ce qui prête à confusion car d'autres procédés plus anciens fonctionnent par ajout de matière) ou encore prototypage rapide.

Cette technologie englobe différents procédés :

- l'extrusion de matière (le plus démocratisé),
- la photopolymérisation (le plus ancien),
- la projection de matière,
- la projection de liant,
- la lamination de papier,
- la fusion de lit de poudre,
- le dépôt d'énergie dirigée.

Cette méthode de fabrication répond très bien à des besoins :

- de prototypage rapide,
- de fabrication d'objets hautement personnalisés,
- de production de géométries complexes impossibles à produire autrement,
- de plus en plus à la production à grande échelle.

Un autre atout de cette technologie réside dans le fait qu'elle simplifie considérablement la gestion des stocks puisqu'il n'est plus nécessaire de stocker une grande variété de pièces mais simplement de la matière première et une base de données des modèles 3D des pièces à produire.

Complément

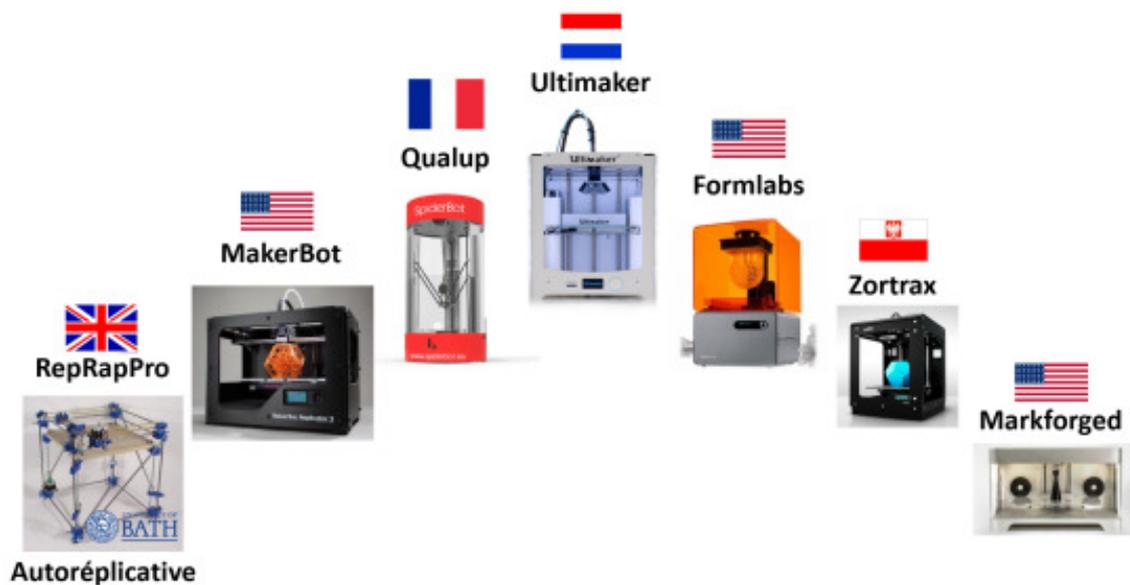
Pour plus d'information : L'impression_3D [\[https://fr.wikipedia.org/wiki/Fabrication_additive\]](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fabrication_additive)

2. Les secteurs et acteurs sur le marché des imprimantes 3D

Dans le domaine des imprimantes 3D, il existe de nombreuses entreprises et profils de clients. Depuis plus de quarante ans, le secteur d'activités a pris de l'ampleur et il devient de plus en plus courant d'avoir une imprimante 3D chez soi ou dans divers entreprises.

Les acteurs des imprimantes 3D sont très majoritairement des entreprises américaines. On peut facilement citer Stratasys et 3DSystems qui ont de très grandes parts de marché pour - respectivement - le dépôt de matière (FDM) et la stéréographie (SLA).

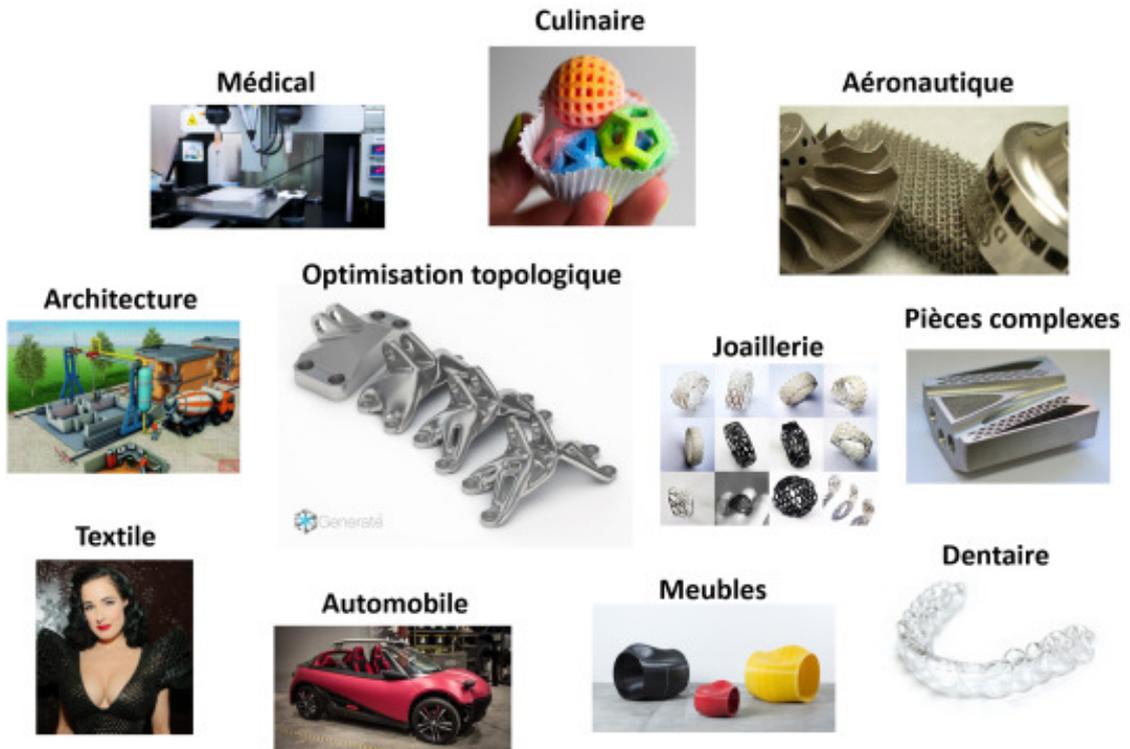
Dans le domaine grand public, les entreprises viennent des 4 coins du globe, il en existe plus d'une centaine. Par exemple, l'entreprise néerlandaise Ultimaker propose des imprimantes 3D fiables dans différents domaines comme l'éducation, l'architecture ou les emballages alimentaires. Actuellement il existe plus de 9 000 brevets sur l'impression 3D, ce chiffre a explosé à partir des années 2000 avec un pic en 2012.



Entreprises de l'impression 3D

Les applications de l'impression 3D

Le secteur de l'impression 3D touche un large éventail de filières, telles que la mode, le monde culinaire, le médical, l'architecture, l'ameublement, l'automobile, l'aéronautique, la joaillerie, etc.



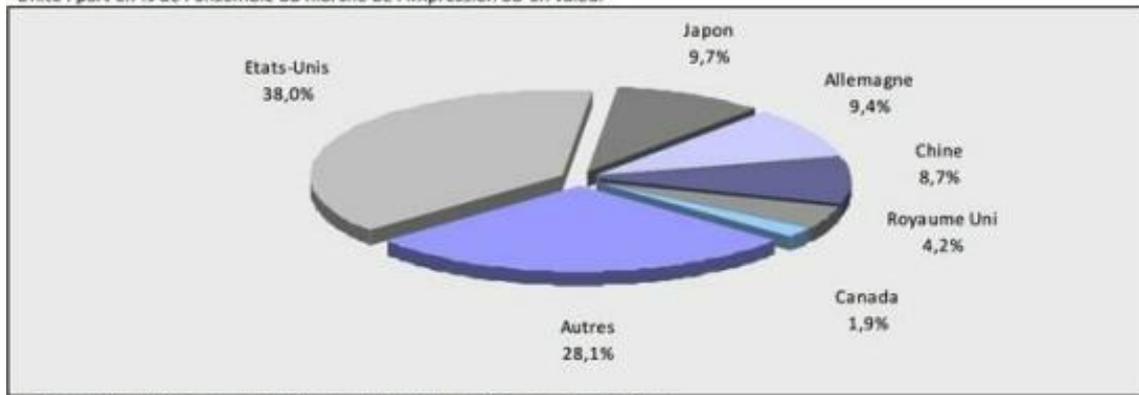
Les applications les plus courantes sont :

- la visualisation et la validation expérimentale de la conception de produits (prototypage),
- la fabrication d'outillage industriel sur mesure,
- la création de produits hautement personnalisés selon les besoins,
- la réalisation de géométries complexes impossibles à réaliser autrement,
- la fabrication de systèmes polyarticulés ne nécessitant pas de montage,
- la production de composants en petites séries selon les besoins de la production pour optimiser les stocks.

Certaines applications actuellement en développement concernent la création d'organes et de tissus humains, la construction d'édifices architecturaux, la confection de vêtements et la préparation de produits alimentaires.

La répartition du marché mondial de l'impression 3D par zone géographique

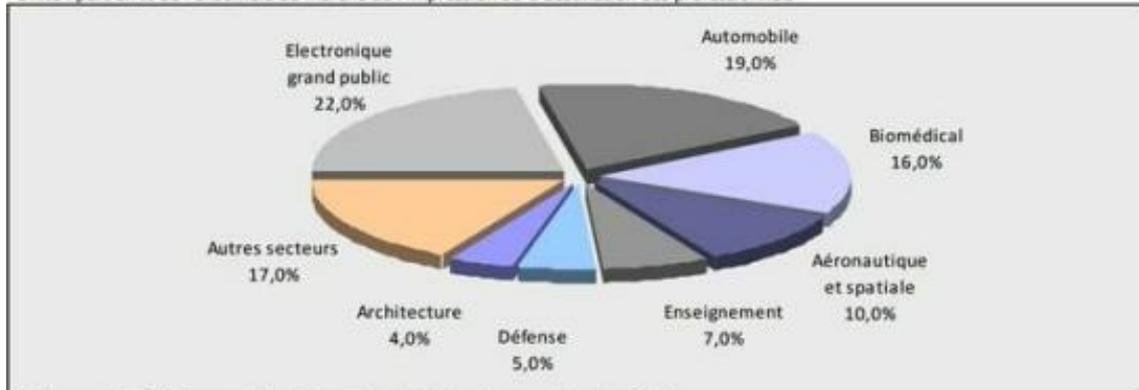
Unité : part en % de l'ensemble du marché de l'impression 3D en valeur



Traitement Xerfi / Source : Crédit Suisse via MonUnivers3D.com, données 2014

La répartition du marché mondial de l'impression 3D par débouchés professionnels

Unité : part en % de l'ensemble du marché de l'impression 3D à destination des professionnels



Traitement Xerfi / Source : Crédit Suisse via MonUnivers3D.com, données 2014

Les avantages de l'impression 3D

Si beaucoup de personnes optent pour l'impression 3D au lieu des techniques artisanales, c'est qu'au fil des années, l'impression 3D propose de plus en plus d'avantages.

Voici les points positifs de l'impression 3D :

- Un temps de fabrication réduit au minimum grâce au nombre de machines et de moules existant qui permettent de réaliser plusieurs impressions en même temps
- La possibilité de faire des designs détaillés et complexes à un prix abordable car il suffit juste de réaliser une seule fois la modélisation
- La possibilité de réaliser des personnalisations sur chaque produit en modifiant le modèle en très peu de temps
- L'autonomie de fabrication car il n'y a pas besoin de superviser l'impression
- Des temps de fabrication réduits au minimum (pas de préparation préalable de la machine, peu de pré-traitement requis, pas de moule, ...)
- La suppression des contraintes liées à la fabrication par usinage
- L'autonomie de fabrication : des machines qui fonctionnent sans intervention humaine et qui ne nécessitent que peu de connaissance pour être utilisées
- Le recyclage des matières en utilisant des machines spécifiques qui reprennent des matériaux déjà utilisés en impression pour les transformer en filament, poudre ou liquide

- La fabrication à base de nouveaux matériaux comme des mélanges de matériaux (polymère + poudre de bois, ou + céramique, ou + poudre métallique, etc.)
- La possibilité de faire une impression 3D à distance sans intervention humaine (ex : sur d'autres planètes !)
- Toujours plus de nouvelles opportunités de conception : constructions cinématiques complexes pré-assemblées, matériaux allégés par le biais d'un maillage complexe 3D, fabrication de pièces non usinables (ex : moules d'injection plastique avec circuit de refroidissement complexe intégré dans la masse), conception de carters en plastique plus fonctionnels, par exemple en apporter des additifs les rendant plus isolant thermiquement ou d'un point de vue électro-magnétique.

Exemple d'objet poly-articulé réalisé sans assemblage :



Exemple d'objet très résistant et très léger : la micro-lattice, très utile pour créer des ailes d'avions :



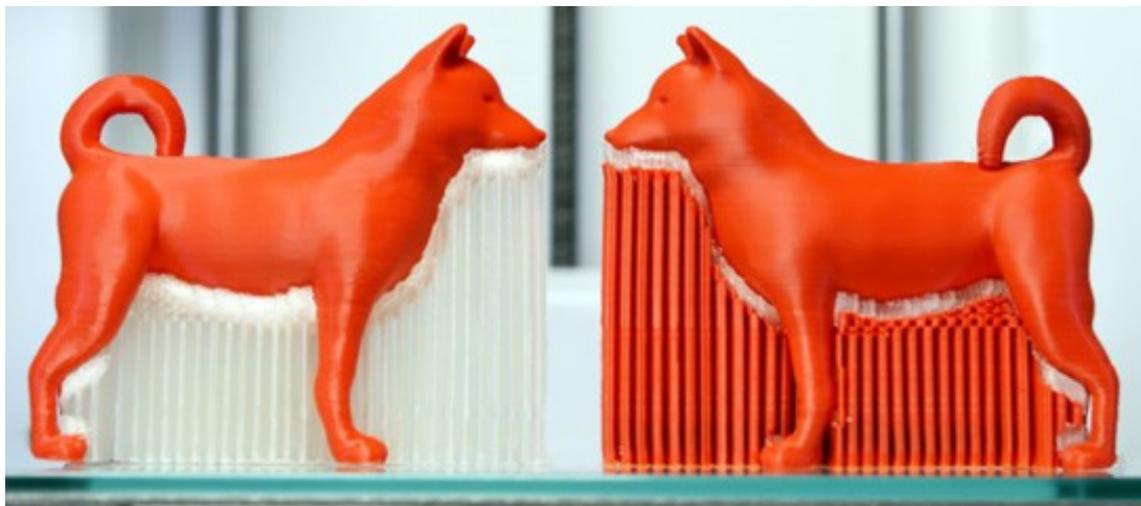
Les inconvénients de l'impression 3D

Malgré cette énumération de points positifs, il existe des points négatifs à l'impression 3D.

Voici les points négatifs à l'impression 3D :

- Ce n'est pas adapté à la production en série d'un grand nombre de pièces,
- La précision géométrique et dimensionnelle des pièces obtenues (de l'ordre du dixième de mm) est nettement inférieure à celle de la fabrication soustractive (de l'ordre du micron : soit 100 fois plus petit),
- L'état de la surface des pièces est généralement rugueux,
- Les propriétés mécaniques sont souvent non isotropes et non homogènes,
- Les pièces produites à base de polymères ont une moindre grande résistance mécanique que leurs équivalents réalisés par des process de plasturgie conventionnels en raison notamment de la fragilité inter-filaire et inter-couche qui sont des sources d'amorce de rupture,
- Pour certains procédés, il est nécessaire de s'appuyer sur un support d'impression pour les géométries en porte à faux qui sont généralement à l'origine de défauts de surface

Exemple de pièces réalisées avec support :



Pour celle-ci, il s'agit d'un support soluble, qui est plus coûteux que la matière traditionnelle et qui génère aussi des défauts du fait du manque d'adhérence entre cette matière et la matière de la pièce. À droite, le support soluble est uniquement déposé à proximité de la pièce, pour faire des économies.



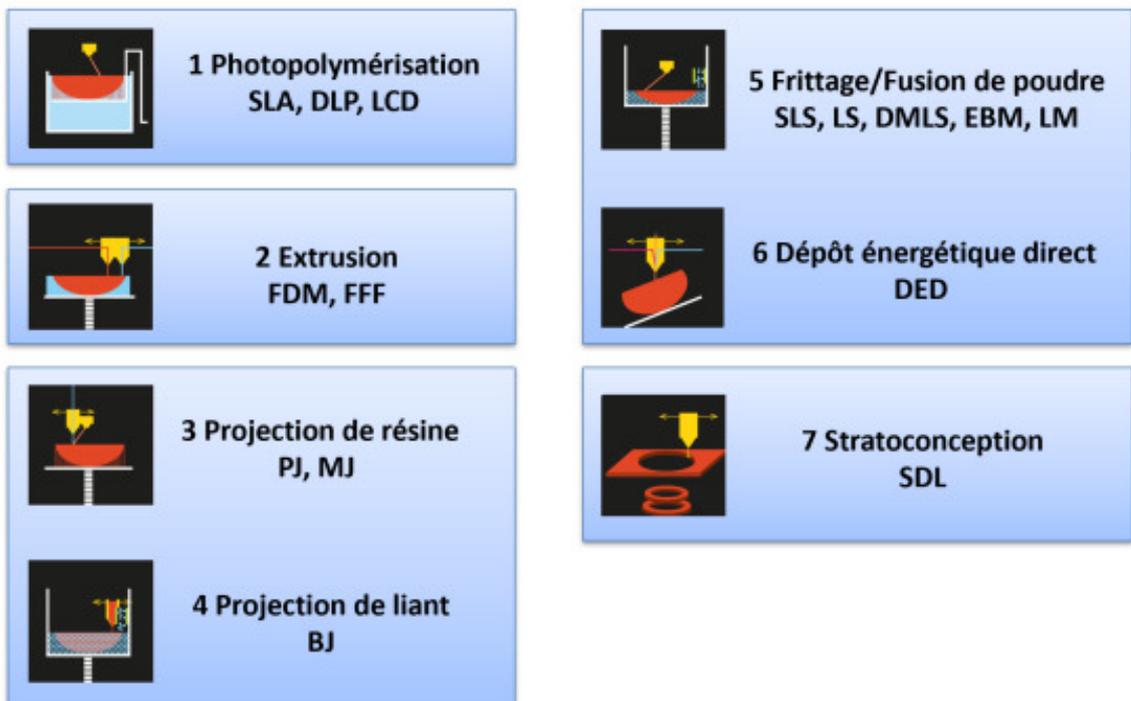
Pour celle-ci, il s'agit de la même matière que la pièce, celle-ci génère des imperfections de surface et peut être parfois très difficile à retirer.

3. Les technologies de l'impression 3D

3.1. Introduction

Il existe 7 procédés de fabrication différents, répartis en 5 grandes familles :

1. La photopolymérisation (SLA, DLP, LCD)
2. L'extrusion (FDM, FFF)
3. La projection :
 - La projection de résine (PJ, MJ)
 - La projection de liant (BJ)
4. La fusion de poudres :
 - La fusion d'un lit de poudre (SLS, LS, DMLS, EBM, LM)
 - Le dépôt énergétique direct (DMP)
5. La stratoconception



Les catégories d'impression 3D

Pour plus d'informations sur les procédés : Les processus [\[https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#04-processes\]](https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#04-processes) & Les procédés d'impression 3D [\[http://www.lesnumeriques.com/imprimante-3d/impression-3d-differents-procedes-a1876.html\]](http://www.lesnumeriques.com/imprimante-3d/impression-3d-differents-procedes-a1876.html)

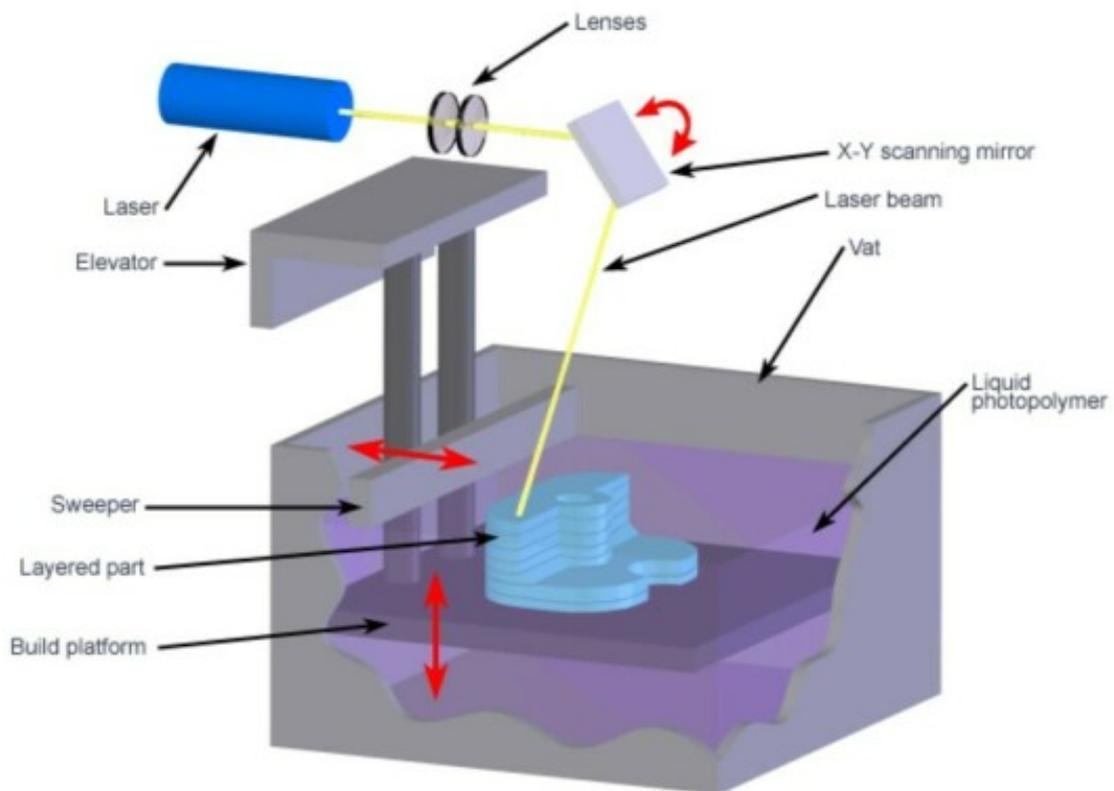
3.2. La photopolymérisation

La photopolymérisation est une technique venant de la stéréolithographie (aussi appelée écriture en relief). La technique consiste à durcir de la résine liquide photosensible au moyen de lumière UV, d'un laser ou de chaleur. L'impression est réalisée couche par couche.

La stéréolithographie ou SLA

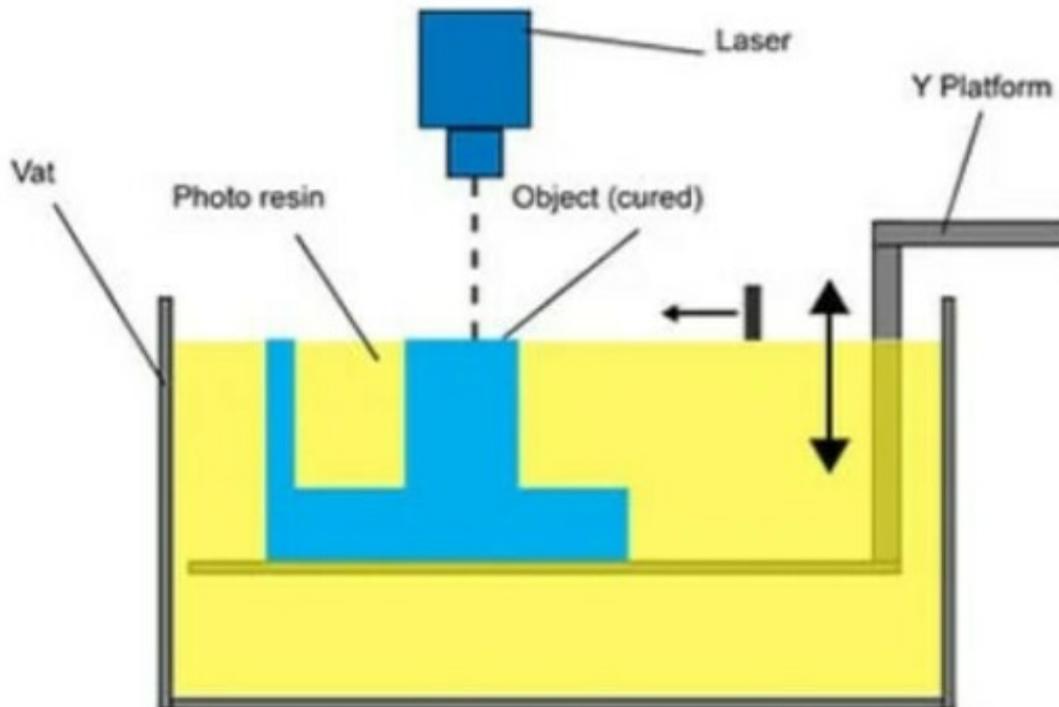
Le procédé SLA est apprécié pour sa capacité à produire des pièces et prototypes isotropes et étanches de haute précision avec des détails fins et une finition de surface lisse

La machine de stéréolithographie (SLA) contient une cuve de résine époxy liquide qui est durcie couche par couche (de 0,10 à 0,15 millimètre) par un faisceau d'ultraviolet ou d'un laser. Une fois terminé, l'objet est sorti de la cuve et la résine non-durcie en surface de la pièce est nettoyée par vibration dans un liquide ou dissoute par un solvant. Selon le type de résine, il faut réaliser une cuisson dans un four UV pour achever de durcir l'objet.



Principe de la Stéréolithographie

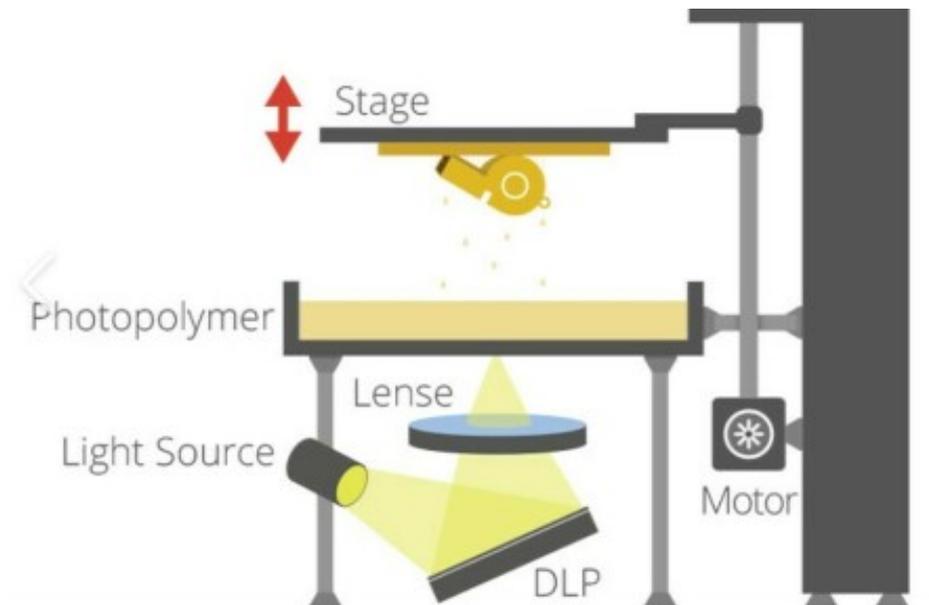
Ce procédé durcit la résine liquide située en surface du bain par le biais d'un laser de grande précision qui balaie la surface en suivant un parcours qui couvre entièrement la surface correspondant à la strate de pièce à produire. Le plateau sur lequel repose la pièce produite descend progressivement au fur et à mesure que les couches sont solidifiées.



Principe de la photopolymérisation par laser direct

La photopolymérisation par DLP

Le traitement numérique de la lumière ou le Digital Light Processing (DLP) est une technique de photopolymérisation qui utilise comme source lumineuse un projecteur à écran numérique qui par un jeu de miroirs et de concentrateur par lentille va diriger la lumière vers le fond du bac où la résine liquide sera polymérisée couche par couche. Le DLP durcit une surface de couche plus importante en un passage que le laser qui ne durcit la matière que point par point. Dans ce procédé, la première couche se situe dans le fond du bac et le plateau qui maintient la pièce monte d'une épaisseur de couche à chaque fois qu'une couche est solidifiée.



Principe de photopolymérisation par projection numérique DLP

Ce procédé est plus économique dans la mesure où il ne faut que très peu de résine pour travailler, seul le fond du bac doit être rempli alors que dans le procédé SLA, l'ensemble du volume du bac doit être rempli de résine. Généralement, dans les machines DLP, le bac se remplit au cours du temps à partir d'un réservoir de résine, ce qui évite à la résine d'être inutilement gaspillée. En effet, la résine étant sensible à la lumière et à la chaleur, le simple fait de la faire sortir de son contenant la dégrade très rapidement.

La photopolymérisation par LCD

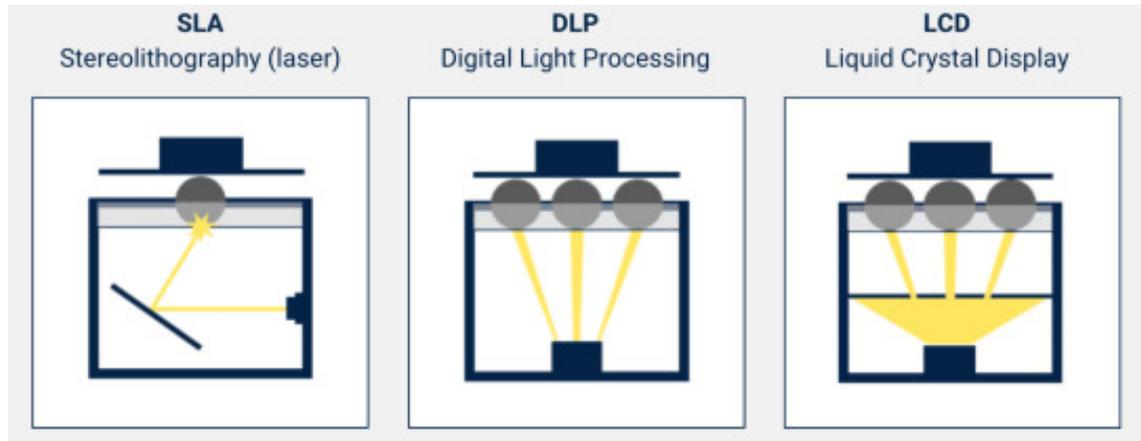
La source lumineuse est dans ce cas un écran Liquid Crystal Display (LCD), la projection d'une image très lumineuse pour durcir entièrement une surface, donc une couche, en un seul passage contrairement au laser de la stéréolithographie qui durcit la couche en suivant un parcours.

Les cristaux liquides, orientés par champs magnétiques, laissent passer ou non une lumière située en rétro éclairage à la manière d'ombres chinoises. La taille des pixels de l'écran influence directement la finesse des pièces produites.

Cette technique est très rapide mais le choix des résines est plus limité que le SLA traditionnel. Cette source peut aussi fonctionner avec des LEDs pour une plus grande précision.

Synthèse

Les trois procédés de photopolymérisation :



Principes des trois procédés

Les avantages de la photopolymérisation sont :

- la très grande précision des pièces produites,
- la capacité à produire des pièces isotropes,
- la rapidité d'exécution en comparaison aux techniques de FDM.

Les inconvénients sont :

- la faible variété de résines disponibles pour ces machines,
- les pièces qui en résulte sont fragiles,
- le nettoyage du bac et des composants de la machine est compliqué et nécessite des produits nocifs (le bac est généralement jeté au bout de plusieurs réalisations),
- les pièces produites doivent être systématiquement nettoyées en sortant de la machine et passée au four à UV, ce qui demande des opérations manuelles supplémentaires,
- le procédé est relativement lent, même en utilisant le DLP ou le LCD.

Complément

Pour plus d'informations : Les procédés d'impression 3D [<http://www.lesnumeriques.com/imprimante-3d/impression-3d-differents-procedes-a1876.html>]

3.3. L'extrusion

Le FDM ou FFF

L'extrusion de filament, plus connue sous l'acronyme FDM (Fused Deposition Modeling), a vu le jour il y a une trentaine d'années grâce à S. Scott Crump, cofondateur de la société Stratasys.

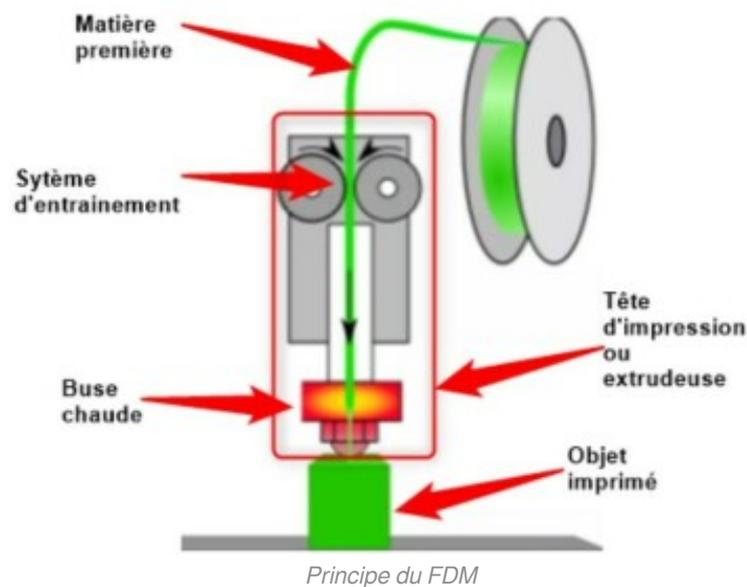
FDM est une marque déposée par Stratasys, c'est pourquoi d'autres appellations ont été créées par des entreprises concurrentes. C'est notamment le cas du FFF (Fused Filament Fabrication), utilisé dans la communauté RepRap sous licence libre.

Il s'agit du procédé utilisé par une écrasante majorité d'imprimantes 3D dites personnelles. Son principe de fonctionnement est simple : un matériau, souvent présenté sous forme de bobine, passe à travers

une buse d'extrusion chauffée entre 170 et 260 °C selon la nature du matériau ou de l'environnement de travail. Le matériau fond et est déposé couche par couche par une buse effectuant des translations selon 2 axes sur un support chauffé ou adhérent. La finesse des couches varie en fonction du matériel et des réglages : 0,02 mm étant souvent la valeur la plus utilisée pour son bon ratio qualité/temps de réalisation/coût. Une fois qu'une couche est terminée, le plateau d'impression descend ou la tête d'impression remonte pour produire la couche suivante, et ainsi de suite.

Le plateau d'impression peut être chauffé pour pallier la déformation due au choc thermique subi par le plastique, en effet, celui-ci passe de plus de 200 °C à la température ambiante quasi instantanément. On peut également trouver des imprimantes FDM dotées de 2 buses d'extrusion. Cela permet entre autres d'imprimer un objet dans deux couleurs différentes ou deux matériaux différents : par exemple pour déposer du support soluble à l'eau en complément de la matière de la pièce.

En plus d'être très abordable, facile d'accès, relativement propre, en comparaison aux autres procédés, le FDM permet d'utiliser une grande variété de matériaux et de couleurs.



Il existe des imprimantes 3D FDM professionnelles qui peuvent produire des pièces plus résistantes mécaniquement en insérant des fibres de carbone, de verre, ou d'aramide dans le matériau lors de l'impression. C'est le cas des imprimantes Markforged.

Le stylo 3D

Le stylo 3D est avant un outil de retouche ou de création artistique. C'est un outil adapté aux enfants comme aux adultes. La pointe du stylo contient une buse qui permet de faire fondre et d'extruder du plastique par une motorisation intégrée. L'admission de fil se trouve à l'arrière du stylo.



Le stylo 3D

Les avantages sont :

- utile pour retoucher des défauts d'impression ou pour réaliser des premiers concepts sans passer par la modélisation 3D,
- permet de recycler les chute de filaments (les fins de bobine notamment).

L'inconvénient de ce produit est qu'il est un outil d'artisanat et non un moyen de production.

3.4. La projection

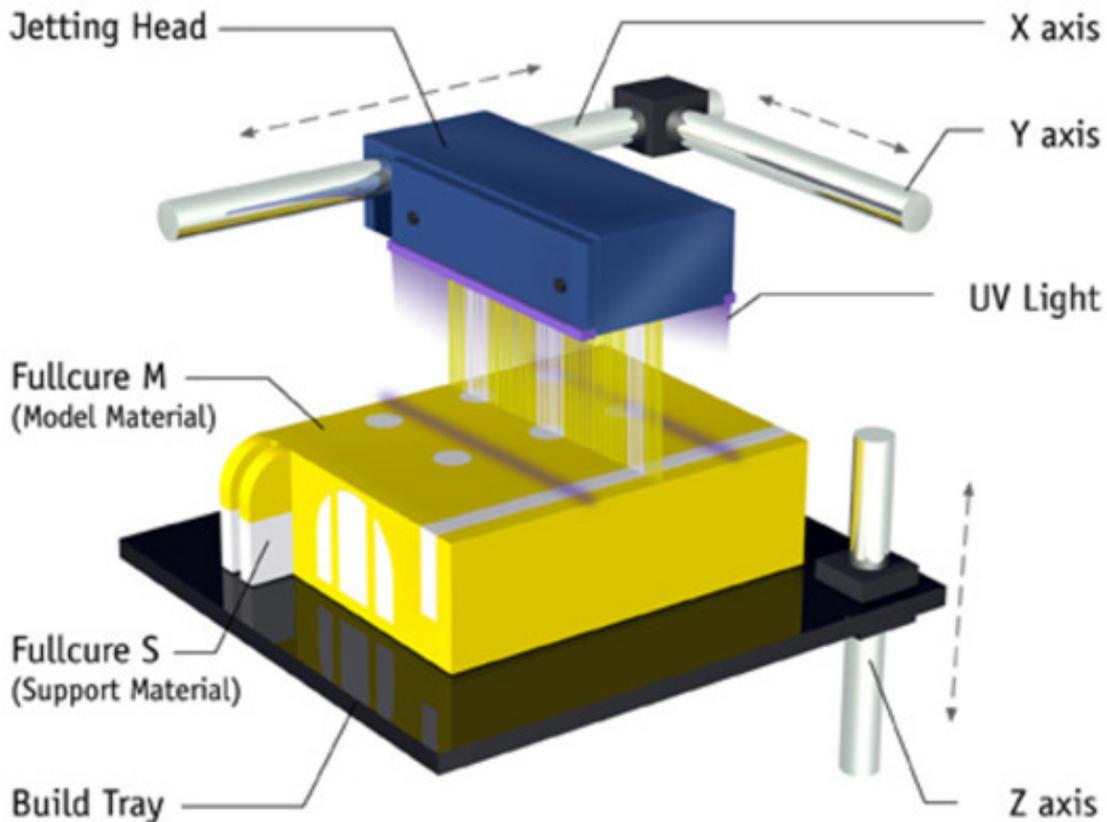
La projection de résine (PJ, MJ)

Le Photopolymer Jetting (PJ), ou Material Jetting (MJ), s'appuie sur la photopolymérisation, tout comme le SLA.

Dans ce procédé, des gouttelettes de matériau sont projetées sur le plateau d'impression selon un motif qui correspond à la tranche de la pièce réalisée. Après chaque jet, le polymère est solidifié grâce à une lumière UV. Les gouttelettes étant liquides, un autre matériau liquide durcissant rapidement en refroidissant est également projeté autour du motif que forme la résine photodurcissable pour la contenir le temps qu'elle durcisse (ce qui peut prendre un temps important). Cet autre matériau sert aussi de

support pour les géométries en porte à faux. Ce matériau peut ensuite être fondu dans un four à 70° ou dissout dans de l'eau selon sa nature, pour être évacué et libérer la pièce produite en résine photodurcissable.

L'avantage de cette technologie, est qu'elle ne nécessite pas d'autre post-traitement que la dissolution du matériau de support, contrairement au SLA qui nécessite du nettoyage, du durcissement au four UV et de l'ébavurage.

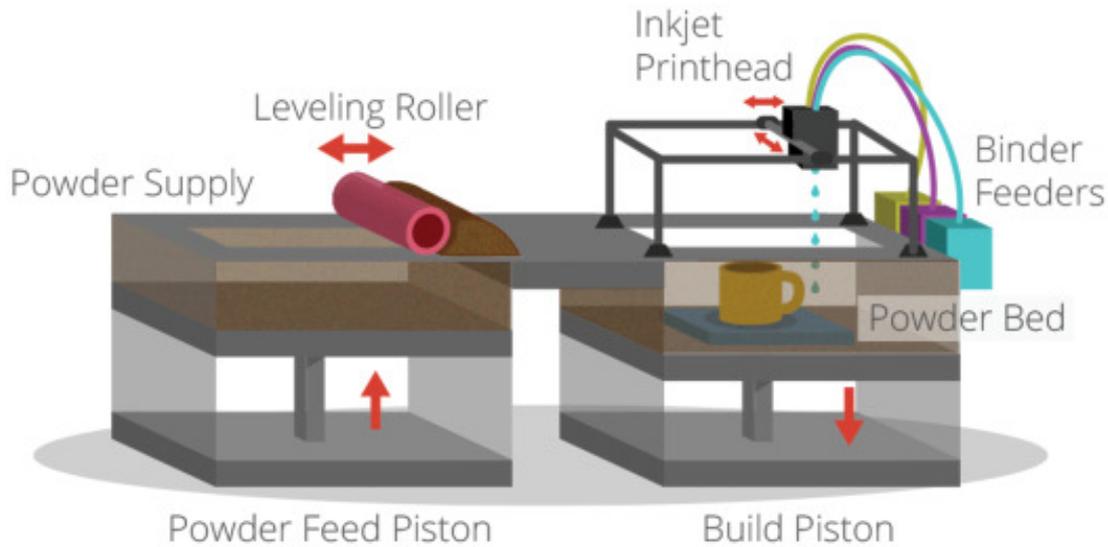


Principe du PJ MJ

La projection de liant (BJ)

La projection de liant (ou Binder Jetting) est une technique qui utilise la projection d'un liant sur un bain de poudre pour l'agglomérer et former les couches de la pièce. Une fois une couche durcie, le plateau descend d'une hauteur de couche, un chariot vient déposer une nouvelle couche de poudre non agglomérée sur la précédente, du liant est à nouveau projeté et ainsi de suite jusqu'à obtention de la pièce finale.

Inkjet: Binder Jetting



Principe du BJ

Les avantages de ce procédé sont :

- il ne nécessite aucun support puisque la poudre assure cette fonction,
- il peut utiliser un grand nombre de matériaux dont la céramique qui peut ensuite être recuite à très haute température pour obtenir une pièce très dure,
- il permet de colorer les pièces avec une palette complète de couleurs en intégrant les pigments dans le liant,
- la poudre non utilisée est parfaitement réutilisable dans un autre cycle.

Le principal inconvénient est que les pièces qui sortent de la machine sont très fragiles et nécessitent un post traitement, soit un recuit, soit un apport de vernis durcissant pour améliorer leurs performances mécaniques.

3.5. La fusion de poudre

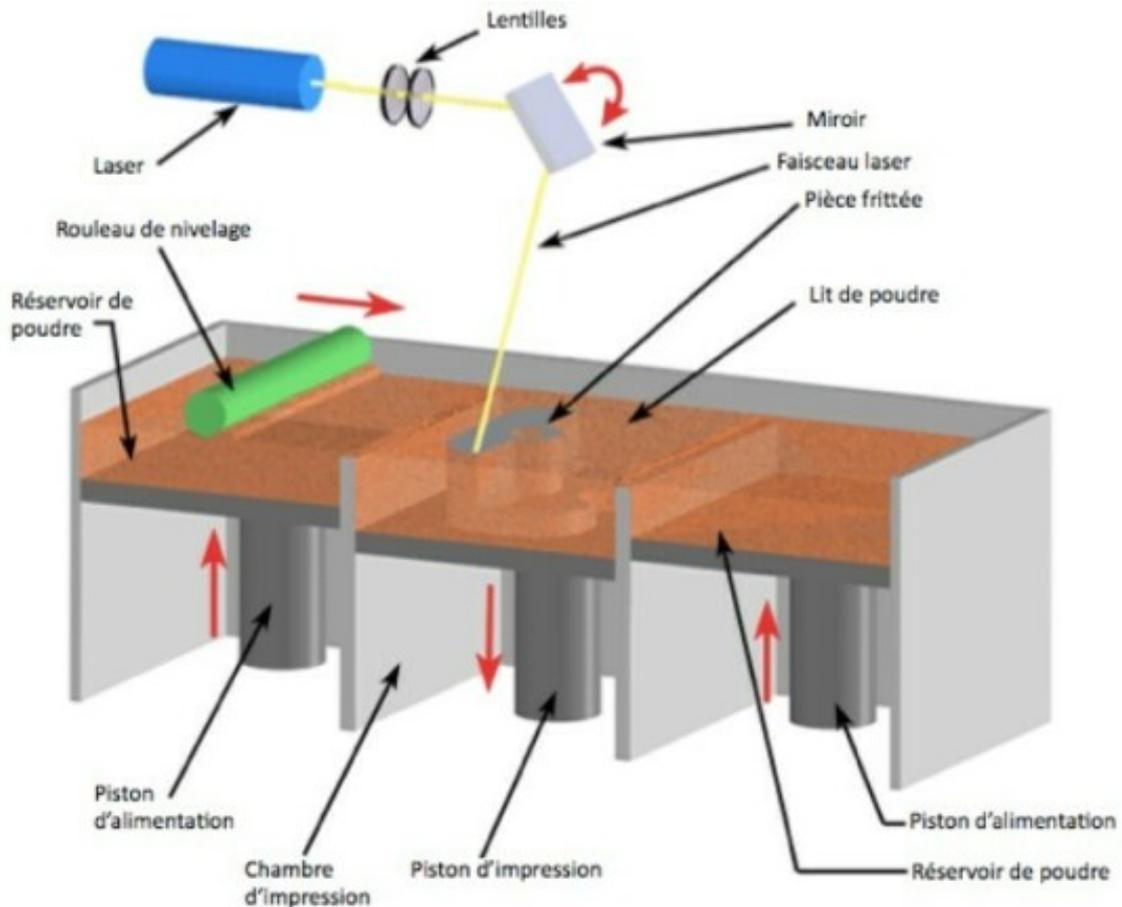
Le frittage par laser (SLS, LS, LM, DMLS, LM)

En impression 3D, le frittage consiste à fusionner des particules de poudre par apport de chaleur concentrée. Il existe plusieurs procédés : le Laser Sintering (LS), le Selective Laser Sintering (SLS), le Laser Melting (LM), le Direct Metal Laser Sintering (DMLS) qui utilisent tous des lasers.

Il s'agit de poudre de plastique, de céramique, de verre ou de métal.

Tout comme pour la projection de liant, ces procédés utilisent un bac qui contient le matériau sous forme de poudre, dont les grains mesurent de 50 à 200 microns de diamètre, mais la différence réside dans le fait que l'agglomération des particules se fait par fusion grâce à une source de chaleur concentrée en un point donné (par laser ou flux d'électrons) qui se déplace pour réaliser le motif de la couche. Une fois la couche durcie, un rouleau vient déposer une fine couche (0,1 mm) de poudre sur la précédente et alors la source de chaleur la durcie. L'opération se répète pour chaque couche jusqu'à obtention de la pièce.

Une fois le processus terminé, on retire l'objet puis on le débarrasse des restes de poudre non fusionnée par air pulsé et un sablage est ensuite envisageable pour lisser l'état de surface.



Principe du SLS

Les avantages de ce procédé sont :

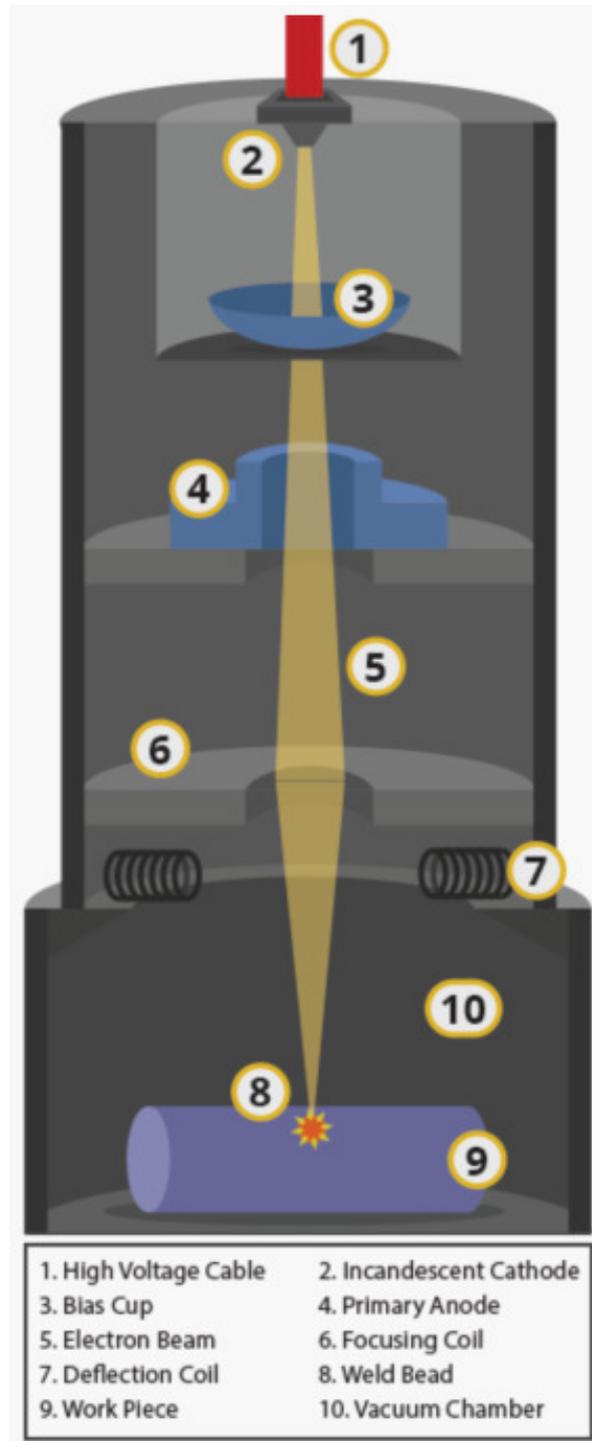
- la possibilité de produire des pièces très solides,
- une grande variété de matériaux pouvant être mise en forme,
- il ne nécessite aucun support puisque la poudre assure cette fonction,
- la poudre non utilisée est parfaitement réutilisable dans un autre cycle.

Les inconvénients sont :

- les pièces ont un état de surface rugueux,
- les poudres sont très volatiles et extrêmement dangereuses pour l'homme compte tenu de leur finesse, notamment en cas d'inhalation, il faut donc placer la machine en salle blanche et doter les opérateurs de combinaisons complètes.

Le frittage par flux d'électron (EBM)

Le Electron Beam Material (EBM) qui diffère des autres procédés à base de laser est plus astreignant puisqu'il nécessite des conditions de vide particulières pour être exécuté. Il est toutefois bien plus efficace pour produire des pièces en alliance métallique très dense et trouve son utilité dans les domaines du médical et de l'aéronautique.

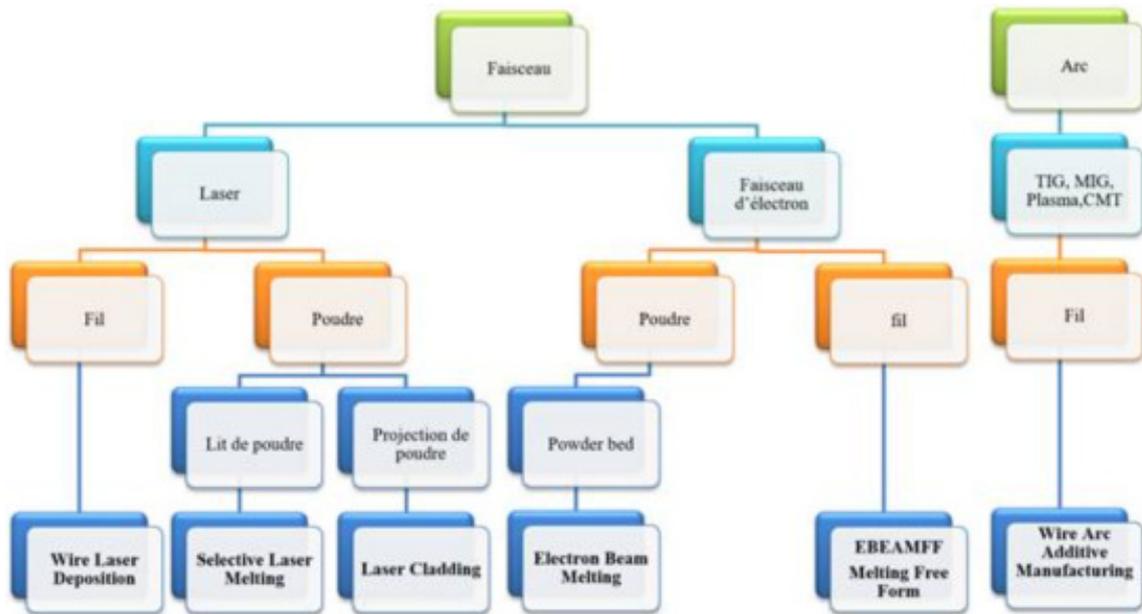


Principe de l'EBM

Le dépôt d'énergie directe (DED)

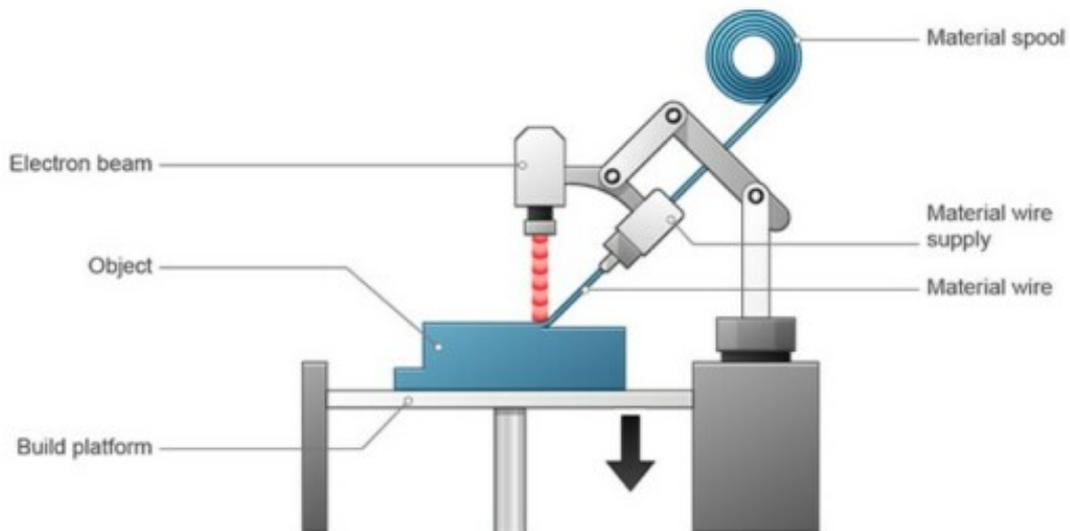
L'impression 3D par dépôt de matière sous énergie concentrée ou DED en anglais (Directed Energy Deposition) est une technique qui consiste à déposer du matériau (poudre ou fil) sur le plateau à l'aide d'une buse montée sur un bras polyarticulé (généralement 4 axes). Lors du dépôt, une source de chaleur fait fondre le matériau simultanément à l'aide d'un laser, un plasma ou d'un faisceau d'électron. Cette procédure est répétée jusqu'à la fin de la fabrication de l'objet. Presque tous les matériaux soudables sont imprimables. Le diamètre des fils est généralement compris entre 1 et 3mm et la taille des particules entre 50 et 150 microns.

Les différentes catégories de DED sont :



Les familles du DED

Elle est souvent référencée sous d'autres noms tels que Laser Engineered Net Shaping (LENS), Direct Metal Deposition (DMD), Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM), CLAD (Construction Laser Additive Directe) en fonction de l'application ou de la méthode.



Principe du DED

Les avantages de cette technique sont :

- les pièces produites sont presque aussi résistantes que des pièces forgées,
- elle offre la possibilité de réparer des objets endommagés par regarnissage,
- elle nécessite moins de matière que les procédés d'usinage traditionnels, notamment pour produire des formes creuses telles que des tuyères de réacteur par exemple.

Les inconvénients sont :

- le nombre limité d'alliages compatibles,
- le prix des machines est exorbitant,

- la surface des pièces produite est généralement granuleuse et la dispersion dimensionnelle est grande, il est donc nécessaire de les réusinier pour maîtriser les états de surface et les cotes.

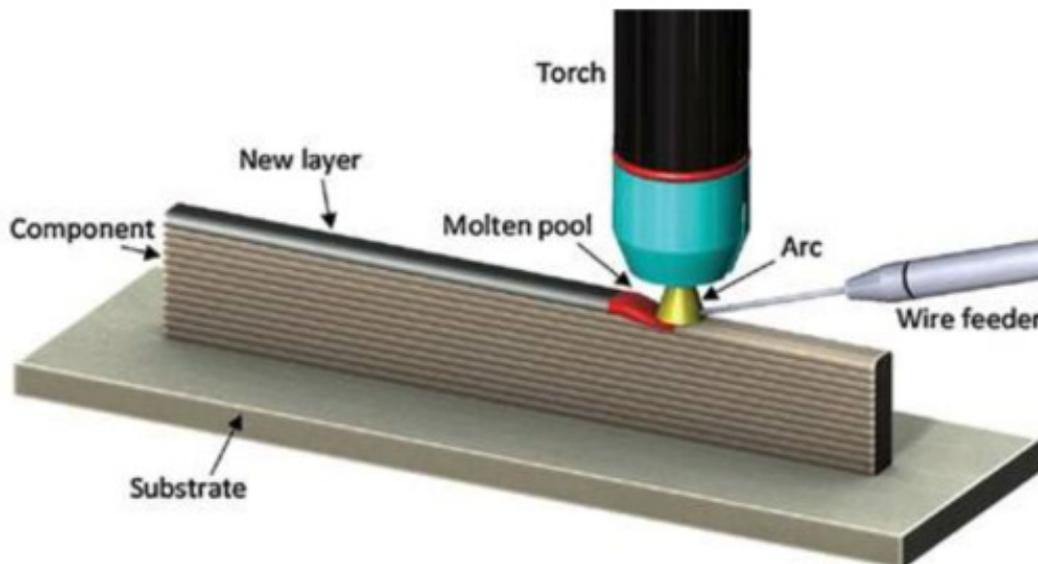
❖ Complément

Pour plus d'information : DED [<https://www.3dnatives.com/depot-de-matiere-sous-energie-concentree-10092019/>]

Le WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing)

Le WAAM est une technique d'impression 3D de métal qui appartient à la famille de la déposition direct d'énergie (DED) mais sort du lot dans la mesure où la technique s'appuie sur les concepts fondamentaux des procédés de soudage automatisés. En effet, le procédé reprend les concepts de soudage à l'arc sous atmosphère gazeuse (inerte ou active) avec fil fusible Metal Inert Gaz (MIG), le Metal Active Gaz (MAG) ou encore le Gas metal arc welding (GMAW), le soudage à l'arc au plasma (PAW) ou le soudage à l'arc au tungstène gazeux (GTAW).

La machine construit les pièces en empilant couche par couche des fils de métal fondus sortant d'une torche de soudure attachée à un bras de robot comme le ferait un procédé FMD à base de fil polymère.



Principe du WAAM

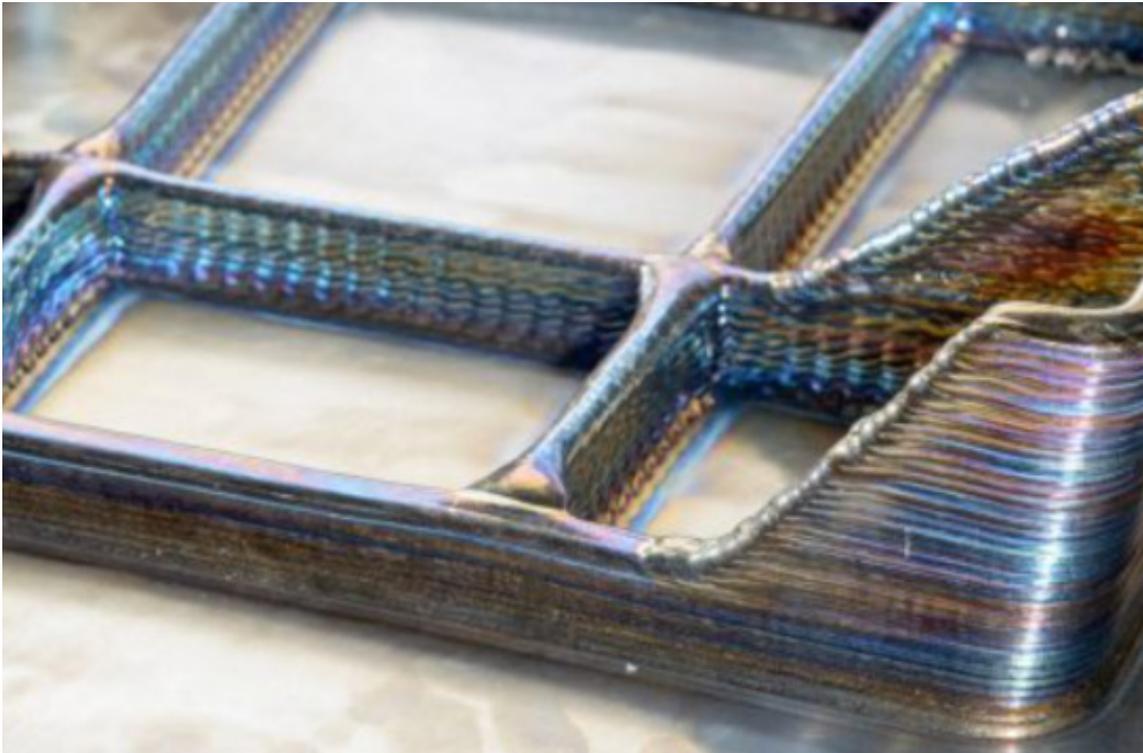
Le WAAM peut aussi être utilisé pour réparer des pièces en métal usée en edommagée comme des rails, des puces électroniques ou alors des rotors par regarnissage et réusinage.

Les avantages de ce procédé sont :

- sa capacité de réaliser des impressions 3D en très grande taille,
- un coût de production relativement bas par rapport aux autres techniques d'impression 3D métallique,
- un large choix de matériaux compatibles,
- une forte réduction des déchets car l'impression utilise la quantité de matière juste nécessaire contrairement à la fabrication soustractive.

Les inconvénients sont :

- le contraintes résiduelles qui conduisent souvent à des déformations de pièce pendant le refroidissement,
- l'état de surface obtenu est déformé par les bourrelets de matière et nécessite donc généralement une reprise en usinage.



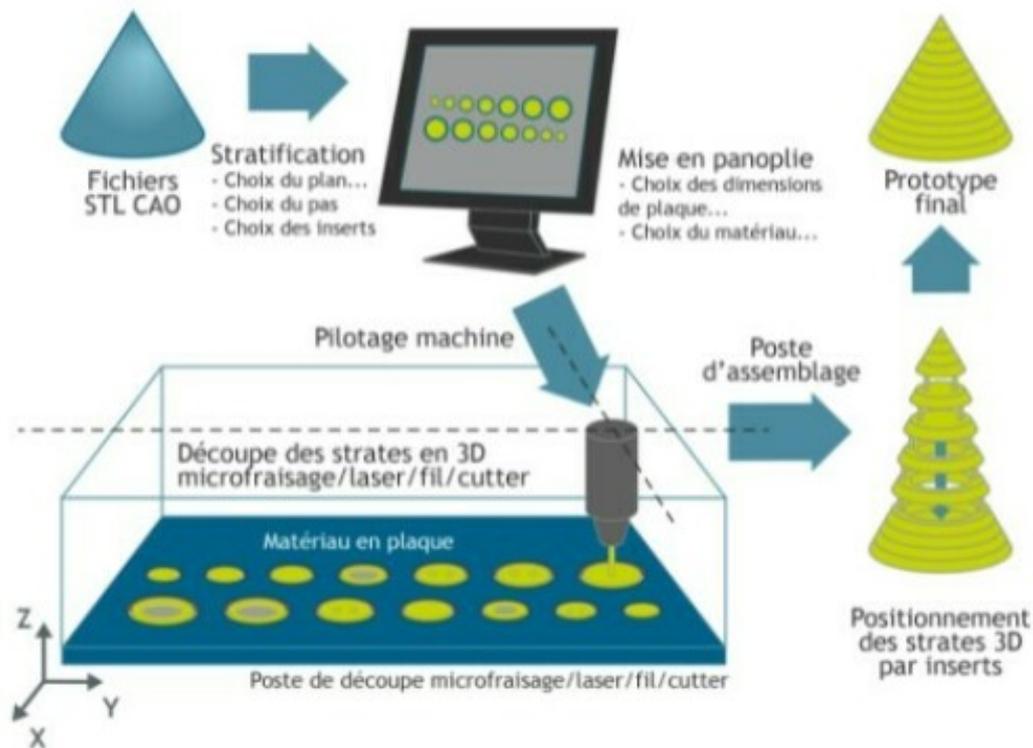
Les défauts de surface du WAAM

3.6. La stratoconception

La stratoconception est une méthode de fabrication additive qui consiste à produire des volumes en empilant des plaques ou des feuilles préalablement découpées.

La découpe du modèle 3D est réalisée en fonction de l'épaisseur des feuilles ou plaques découpées. La machine découpe la matière au moyen d'un laser ou d'une microfraisage ou d'un fil ou encore d'un cutter. Les couches sont empilées et liées les unes aux autres au fur et à mesure de la découpe.

Ce procédé est compatible avec un large choix de matériaux tels que les métaux, les polymères ou encore le bois.

*La stratoconception*

Les avantages de cette technique sont :

- la possibilité de faire des grandes pièces,
- une grande diversité de matériaux,
- une grande précision notamment pour les courbures,
- la possibilité de teinter les feuilles ou plaques pour obtenir des pièces polychromatiques.

Les inconvénients sont :

- la lourdeur de l'étape d'assemblage des sections surtout si elle n'est pas automatisée (notamment pour le collage),
- les déchets en raison des importants résidus de découpe.

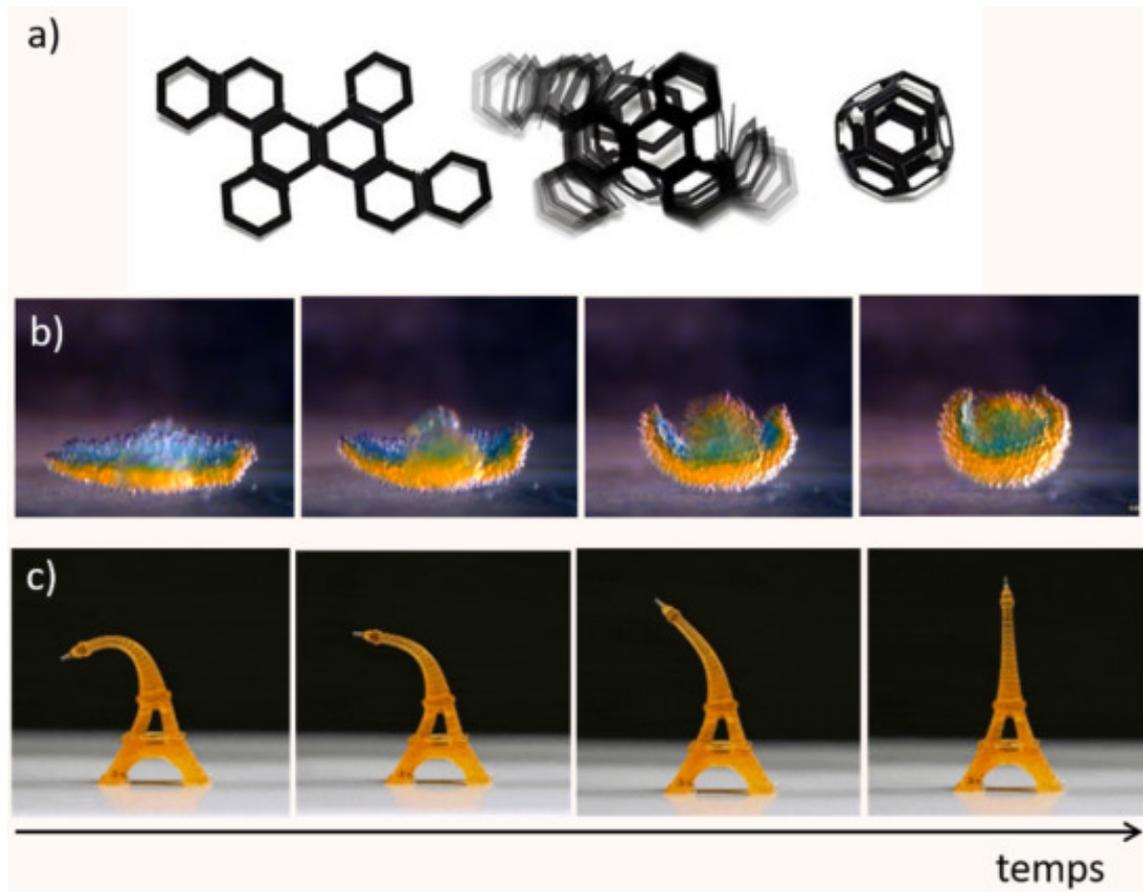
3.7. L'impression 4D

L'impression 4D, désigne la création de pièces 3D dont la forme évolue au cours du temps en fonction de stimuli externes. Les stimuli peuvent être de différente nature : physiques (champ électrique, champ magnétique, lumière, température, vibrations), chimiques (PH, photochimie) ou biologiques (glucose, enzymes, biomolécules)

Cette technologie permet de créer des objets ayant des comportements dynamiques bien qu'ils soient dépourvus d'effecteurs intégrés.

Les procédés de mise en forme restent traditionnels, la différence réside dans les matériaux utilisés :

- polymères à mémoire de forme (PMF) qui sont des matériaux capables de mémoriser une forme macroscopique, de la conserver pendant un certain temps, et de reprendre leur forme d'origine,
- élastomères à cristaux liquides (LCE en anglais) qui, comme leur nom l'indique, contiennent des cristaux liquides sensibles à la chaleur. En contrôlant leur orientation, on peut programmer la forme souhaitée,
- hydrogels. Ce sont des chaînes polymères principalement constituées d'eau, particulièrement utilisés dans les procédés de photopolymérisation,
- des multi-matériaux : ce sont principalement des composites (bois, carbone, etc.) qui sont ajoutés aux PMF ou aux hydrogels.



Exemple d'impression 4D : a) structure avec auto-assemblage, b) : tissu synthétique à comportement organique, c) : mémoire de forme piloté par température

Les applications potentielles sont nombreuses :

- composants capables de s'auto-assembler sans intervention humaine,
- composants auto-adaptables capables de combiner détection et actionnement au sein d'un même matériau,
- composants auto-réparables pour compenser des défauts (d'usure, de fabrication),
- robots miniatures souples capables de travailler dans des environnements dangereux ou de se déplacer en milieu confiné, comme dans le corps humain, pour livrer un médicament ou pour effectuer des opérations micro-invasives,
- endoprothèses, organes et tissus intelligents,
- cellules solaires auto-orientables en fonction de l'angle d'incidence la lumière,

- textiles biomimétiques auto-adaptatifs,
- etc.

Complément

Pour plus d'information : L'impression 4D [<https://www.polytechnique-insights.com/dossiers/industrie/comment-les-nouveaux-materiaux-transforment-lindustrie/impression-4d-les-materiaux-intelligents-du-futur/#:~:text=L'impression%204D%2C%20a%3B9%20la,r%C3%A9pondent%20activement%20aux%20stimuli%20externes.>]

3.8. Comparaison des procédés

Il est souvent délicat de choisir un procédé au regard des besoins, ce tableau donne quelques pistes de choix :

Comparaison des attributs de prototypes								
ATTRIBUT	SL	SLS	DMLS	FDM	SDP	PJET	CNC	IM
Quantité	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊕	⊕
Complexité	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊖	⊕
Finition de surface	⊕	⊖	⊖	⊖	⊖	⊕	⊕	⊕
Choix du matériau	⊕	⊖	⊕	⊖	⊖	⊖	⊕	⊕
Stabilité du matériau	⊖	⊕	⊕	⊕	⊖	⊖	⊕	⊕
Couleur	⊕	⊖	⊖	⊕	⊕	⊖	⊕	⊕
Tolérance	⊖	⊕	⊕	⊖	⊖	⊖	⊕	⊕
Rapidité	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊖
Prix - faible volume	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊖
Prix - volume élevé	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊕

⊖ Médocre ⊕ Assez bon ⊕ Bon

Définitions Les définitions varient et peuvent différer d'une entreprise à l'autre, mais on pourra utiliser les définitions ci-après comme point de départ.

Haute conception - Haute précision relative au matériau pour fabriquer une pièce. Les caractéristiques sont appréciables pour les personnes travaillant dans divers domaines des domaines de voir concrètement une idée, elles visent la réflexion et la discussion et motivent l'adoption du projet.

Attributs de PROTOTYPAGE INFORMATIQUE

Rapidité - Délai nécessaire pour convertir un fichier informatique en prototype physique.

Aspect - tout attribut visuel - couleur, texture, dimensions, forme, etc.

Test d'assemblage/ajustement - Capacité à fabriquer tout ou partie des pièces d'un ensemble, les assembler et vérifier qu'elles s'ajustent bien. À un niveau rudimentaire, ce test permet d'identifier les erreurs de conception telles que deux languettes adjacentes par un intervalle de 2 cm alors que les formes correspondantes sont séparées par un intervalle de 1 cm. À un niveau plus fin, il permet de constater les différences dimensionnelles mesurées et les tolérances. Il est évident que tout test concernant des tolérances doit valider le processus de fabrication réel ou un processus ayant des tolérances similaires.

Forme - la forme de la pièce - ses caractéristiques et ses dimensions.

Ajustement - comment la pièce s'assemble avec d'autres pièces.

Tests mécaniques - Seront à voir comment une pièce ou un ensemble fonctionnent en les soumettant à des contraintes préfigurant celles qu'ils rencontreront dans leur utilisation réelle.

Résistance chimique - résistance aux produits chimiques, notamment aux acides, aux bases, aux hydrocarbures, aux carburants, etc.

Propriétés mécaniques - résistance de la pièce mesurée en relation à la traction, résistance à la compression, résistance à la flexion, résistance aux chocs, résistance à la déformation, etc.

Propriétés électriques - interaction entre les champs électriques et la pièce. Elles peuvent concerner la conductivité électrique, la force électrique, le facteur de dissipation, la résistance superficielle et volumique, la dissipation de l'électricité statique, etc.

Propriétés thermiques - Modifient les propriétés mécaniques, se produisant sous l'effet de changements de température. Elles peuvent concerner le coefficient d'expansion thermique, la température de distortion à chaud, le point de ramollissement Vicat, etc.

Propriétés optiques - aptitude à transmettre la lumière. Peut comprendre l'indice de réfraction, la transmission et la diffusion.

Propriétés aux rayonnements (UV, charge ou déformation) - capacité à résister à une exposition aux ultraviolets avec un niveau de dégradation acceptable, capacité de la pièce à résister à des contraintes photogées avec un niveau de déformation acceptable.

Tests réglementaires - Tests spécifiques réalisés par une autorité de régulation ou une organisation de normalisation afin de garantir que les pièces seront utilisées de manière sûre dans une application donnée. Ces organismes sont par exemple l'ISO (International Organization for Standardization) et le CEI (Commission européenne), la FDA (US Food and Drug Agency), le FCC (US Federal Communications Commission), l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute), le CSA (Canadian Standards Association), la FDA (US Food and Drug Agency), le FCC (US Federal Communications Commission), l'ISO (International Organization for Standardization) et le CEI (Commission européenne).

Résistance au feu - degré d'inflammabilité d'un matériau ou d'une pièce en présence de feu.

Propriétés EMI/RFI (interférences électromagnétiques/radioélectriques) - aptitude d'un matériau d'une pièce ou d'un ensemble à filtrer ou à bloquer les interférences électromagnétiques ou radioélectriques.

Qualité alimentaire - aptitude pour l'utilisation d'un matériau ou d'une pièce pour les applications où ils se trouvent en contact avec des aliments en cours de consommation, sans nuire au consommateur.

Bio-compatibilité - aptitude d'un matériau ou d'une pièce à pouvoir être en contact avec le corps humain ou animal, à l'intérieur ou à l'extérieur du corps, sans causer aucun effet nocif (ex. : infections, réaction avec le sang, toxicité, etc.). La bio-compatibilité est requise pour les instruments chirurgicaux et pour beaucoup d'autres appareils médicaux.

Comparaison des procédés de fabrication

4. Les matériaux utilisés en impression 3D

4.1. Introduction

Les matériaux utilisés en impression 3D sont très variés et leur choix dépend à la fois du procédé et des fonctionnalités recherchées.

4.2. Les plastiques

Le PLA (acide polyactique)

C'est une matière très utilisée lors des impressions 3D en FDM et se présente sous forme de filament. Il est fabriqué à partir d'amidon de maïs (ou de racine de manioc ou de betterave), ce qui lui permet d'être au contact d'aliment. En revanche, c'est une matière sensible à l'eau, aux UV et à la chaleur. Son utilisation répétée à l'une ou l'autre peut fortement endommager la matière.

En impression 3D, le PLA fond aux alentours de 160-220 °C et ne nécessite pas de plateau chauffant. Il peut être recouvert de peinture mais le ponçage est à éviter, les frottements favorisent la chaleur qui peut modifier la forme de l'objet. L'avantage du PLA est qu'il se présente sous une multitude de bobines variables, notamment au niveau des couleurs

L'ABS (acrylonitrile butadiène styrène)

C'est aussi une matière très utilisée en impression 3D et fabriquée à base de pétrole.

Il est notamment utilisé pour la fabrication des pièces LEGO. Sa résistance à l'eau et à la chaleur est meilleure que celle du PLA et son rendu plus lisse. Sa température de fusion est de 200-250 °C mais il lui faut un plateau chauffant pour éviter qu'il se rétracte en refroidissant. Il se présente sous forme de bobine de filament ou de polymère liquide pour le procédé SLA. Il est soluble dans l'acétone, ce qui est pratique quand on doit souder des pièces métalliques ou pour lisser la matière par broyage, par trempage ou par mise en présence de vapeur.

Le PETG (polytéréphtalate d'éthylène modifié au glycol)

C'est un matériau plus solide que l'ABS, très utilisé pour des pièces qui demandent de la flexibilité et robustesse. Il est adapté au contact alimentaire. Sa température de fusion est de l'ordre de 220 °C et il ne dégage aucune odeur.

Le PC (Polycarbonate)

C'est un matériau résistant aux chocs, à la chaleur (jusqu'à 120 °C), il présente de bonnes performances

mécaniques. Il est en revanche difficile à mettre en œuvre puisque sa température de fusion est de 260 °C, il requiert également de chauffer le plateau à 90 ° et une enceinte fermée est préconisée.

Le PEEK et PEKK (polyétheréthercétone)

Ce sont des matières difficilement inflammables, résistantes aux hautes températures, aux agents chimiques et aux rayonnements à haute énergie. Disponibles en poudres pour le SLS ou en filaments pour le FDM. Ce sont des matériaux coûteux qui nécessitent des imprimantes professionnelles, puisque la température d'impression doit être comprise entre 380 et 440 °C, la température de lit supérieure à 100 °C et une enceinte chauffée est nécessaire, à une température d'environ 140 °C.

Le PEI (polyétherimide) ou ULTEM®

Ce sont des matériaux haute performance de part leur résistance chimique, leur rapport poids/résistance mécanique et leur tolérance au feu, à la fumée et à la toxicité. Ils nécessitent des imprimantes 3D plus industrielles puisque leur température d'extrusion est de 370-400°C et que la température du plateau d'impression doit être de 150°C et la chambre doit être idéalement à 80 °C.

Les TPU et TPE (élastomères thermoplastiques)

Ce sont des matériaux très flexibles, possédant une forte élongation à la rupture, disponibles filament pour le FDM. Le TPE est plus tendre et moins résistant à l'abrasion que le TPU.

Les polyamides (Nylon)

Utilisés sous forme de poudre pour le frittage laser (SLS), on compte notamment parmi les polyamides, le nylon qui est une matière élastique et résistante qui est disponible également sous forme de bobine de filament pour le FDM. Sa température de fusion est d'environ 235-260 °C et ne nécessite pas forcément de plateau chauffant. Il est aussi compatible avec les aliments.

Les CFR (chargé fibre)

Ce sont des polymères chargés par des fibres composites courtes (Verre, Carbone, Kevlar) ou longues (Exclusivité Markforged) qui ont de meilleures résistances mécaniques que leurs homologues non chargés. Disponibles sous forme de filament. Leur extrusion nécessite des buses plus résistantes à l'abrasion.

Les résines

Très souvent utilisées pour des impressions très détaillées mais peu solides, elles sont utiles pour réaliser des formes complexes en SLA. Ce sont généralement des polymères photosensible disponibles sous forme liquide.

Le PVA (alcool polyvinylique)

C'est un matériau de support utilisé dans les impressions 3D utilisant le dépôt de filament fondu, notamment avec les machines à plusieurs buses d'extrusion. Il est biodégradable, et se dissout dans de l'eau mais son coût est important.

Le HIPS (high impact polystyrène)

C'est un matériau de support utilisé de la même manière que le PVA, à la différence qu'il se dissout dans du limonène. Sa dissolution demande plus de temps que le PVA et le limonène peut être agressif pour certains polymères, il est préconisé de l'utiliser comme support de pièces en ABS qui résiste à ce solvant. Sa température de fusion est comprise entre 230 et 245 degrés. Un plateau chauffant atteignant des températures entre 90 et 110 degrés est conseillé car le matériau a tendance à se déformer. Il est également recommandé d'utiliser une imprimante 3D avec une chambre fermée.

4.3. Les métaux utilisés en SLS, EBM et DED

L'aluminium

Très souvent utilisé dans des alliages comme AlSi10Mg mélangé avec le silicium et le magnésium, l'aluminium est un alliage léger et résistant à la fois. Il est très utilisé dans la fabrication de moteur, dans l'aérospatial ou pour des moules à parois fines et aux géométries complexes.

L'alumide

Alliage fait à partir d'un polymère et d'aluminium trouvable sous forme de poudre, il reste très léger, et a un aspect proche de celui du métal. En revanche, il n'est pas aussi solide que du véritable métal. C'est une matière non-étanche car poreuse. Il est utilisé par la technique de frittage laser avec des particules d'alumine de 60 µm.

L'acier

L'acier est l'un des matériaux les plus utilisés dans l'industrie. C'est le premier métal à être commercialisé pour la fabrication additive. Il possède des propriétés mécaniques de haute résistance à la corrosion.

Le cobalt-chrome

C'est un matériau très résistant et solide malgré l'usure. On le retrouve notamment dans les prothèses médicales et l'industrie dentaire. Il est relativement résistant à des températures de plusieurs centaines de degrés, idéales pour la fabrication de moules. Compatible avec les imprimantes EBM (technique voisine du SLS).

Le titane

Très utilisé dans l'industrie pour son excellent rapport poids/solidité et sa résistance à la corrosion. Mélangé avec certains métaux, il peut être biocompatible et utilisable dans la fabrication de prothèses mais aussi pour l'automobile et l'aéronautique. Les inconvénients du titane sont son prix assez élevé et le fait qu'il refroidit rapidement, ce qui nécessite d'avoir des outils spécifiques pour le maintenir plus longtemps à la chaleur.

4.4. Les céramiques

L'avantage des céramiques est qu'elles sont pratiques pour des réalisations complexes.

On peut l'utiliser avec les imprimantes SLS, Si on utilise de la poudre de céramique, SLA, lorsque la céramique est couplée à de la résine, BJ ou encore FDM. Il est biocompatible, pratique pour les objets en contact des aliments ou pour la médecine.

La plupart du temps les pièces réalisées en céramique nécessitent un passage en four à haute température (supérieure à 1000°C) pour obtenir un émailage séché (cela sert à durcir l'objet et à le rendre lisse et brillant). C'est durant cette phase que l'émail obtient sa couleur.

4.5. Les matériaux organiques

Les cires

La cire est généralement imprimée au moyen de la technique de projection de résine (PJ, MJ) . La cire imprimée en 3D est utilisée pour créer des moules grâce à la technique de la fonte à la cire perdue. Le moulage en 3D à la cire perdue (ou fonte à la cire perdue) constitue un procédé de production qui permet principalement de produire des pièces de joaillerie personnalisables de très haute qualité et cela dans différents métaux.

Le processus consiste à imprimer en 3D une pièce en cire de l'objet désiré, puis à ajouter ensuite un matériau réfractaire autour de la pièce, on obtient alors un moule. Le passage du métal fondu dans le moule fait fondre de la cire se trouvant à l'intérieur et crée alors un espace vide qui est rempli de métal. Il ne reste plus qu'à briser le moule pour obtenir l'objet final. De nombreuses options de finition sont alors disponibles.

Les matières alimentaires

Le procédé d'extrusion se prête bien à la production d'objets en chocolat, en sucre, ou en fromage. De nombreuses matières alimentaires peuvent être utilisées. Le résultat reste encore toutefois controversé par rapport à l'hygiène.

Le bois

Il est possible de réaliser des pièces en bois en stratoconception, en projection de liant (BJ) sur de la poudre de bois, ou en le mélangeant sous forme de poudre ou de fibres à d'autres matériaux comme du

polymère, afin qu'il puisse être manipulé sous forme de filament, la température d'extrusion est de 185-230 °C dans ce cas.

Les tissus biologiques

La bio-impression de tissus biologiques utilisent généralement les techniques d'impression spécifiques par laser, micro extrusion ou jet d'encre biologique. Leur utilisation est médicale notamment dans le cadre de greffes d'organe. On utilise ce procédé car il est plus efficace que les xénogreffes.

4.6. Les pigments

Il est possible lors des impressions 3D de mélanger des pigments liquides aux résines de photopolymérisation opaques ou transparentes, soit directement dans le bac pour obtenir une pièce de couleur unie soit dans les gouttelettes projetées avec les procédés PJ et MJ afin d'obtenir des pièces polychromatiques.

Il est aussi envisageable d'ajouter des pigments sous forme de poudre (mica, cuivre, ...), en les mélangeant avec la résine avant de la mettre dans le bac. Cependant, la poudre peut avoir une masse volumique plus élevée que la résine, ce qui lui donne une tendance à couler dans le fond du bac. Dans ce cas, il faut prévoir des supports adaptés lors du pré-traitement pour éviter que l'objet ne se détache lors de la fabrication.

4.7. Les matériaux hybrides

Les matériaux composites sont une alternative aux polymères bruts afin d'accroître leur fonctionnalité. Dans ce domaine, le champ des possibles est très grand et de nombreuses recherches sont menées.

Pour ne citer que quelques exemples :

- des filaments à base de marc de café recyclé mélangé à du PLA pour obtenir une teinte particulière,
- du chanvre mélangé avec du PLA pour éviter les phénomènes de retassure,
- du béton fibré en utilisant 3 buses, une pour le ciment, une autre pour le granulats et la dernière pour la fibre de verre afin de pouvoir imprimer des murs,
- des filaments à base de poudre de grès pour avoir une texture proche de la roche,
- des filaments magnétiques à partir de poudre de fer, etc.

4.8. Compatibilité entre les technologies d'impression 3D et les matériaux

Tous les matériaux ne sont pas compatibles avec tous les procédés et les performances d'un même matériau peuvent différer selon le procédé de mise en oeuvre.

Ci-dessous, une comparaison entre les procédés et compatibilité des matériaux :

PROCÉDÉ	DESCRIPTION	ROBUSTESSE	FINITION	EXEMPLES DE MATÉRIAUX
Stéréolithographie - SL	Photopolymérisation au laser	17,2-68,9 (mpa)	Couches additives 0,051-0,152 mm en moyenne	Photopolymères ressemblant à des thermoplastiques
Frittage sélectif par laser - SLS	Frittage laser de poudres	36,5-77,9 (mpa)	Couches additives 0,102 mm en moyenne	Nylon, métaux
Frittage direct de métal par laser - DMLS	Frittage laser de poudre de métal	260-1310 (mpa)	Couches additives 0,020-0,050 mm en moyenne	Acier inoxydable, titane, chrome, aluminiums, Inconel
Dépôt de fil fondu - FDM	Extrusions fondues	35,9-67,6 (mpa)	Couches additives 0,127-0,330 mm en moyenne	ABS, PC, PC/ABS, PPSU
BJET	Liant liquide imprimé par jet sur de la poudre	Faible	Couches additives 0,089-0,203 mm en moyenne	Poudre à base de plâtre/ liant liquide
Poly-Jet - PJET	UJet de résine photopolymère durcie par UV	49,6-60,3 (mpa)	Couches additives 0,015-0,30 mm en moyenne	Photopolymères à base acrylique, Photopolymères élastomères
Usinage CNC	Usinage sur machine CNC	20,7-137,9 (mpa)	Procédé d'usinage soustractif (lisse)	La plupart des thermoplastiques techniques métaux
Moulage par injection - IM	Moulage par injection - moule aluminium	21,4-137,9 (mpa)	Moulage lisse (ou avec texture sélectionnée)	La plupart des thermoplastiques techniques

Comparaison des procédés en terme de finesse et de robustesse

Ci-dessous, une matrice qui présente les atouts des matériaux et leur compatibilité avec les machines de FDM :

Matériau	À imprimer dans un carton	Boîte sèche recommandée	Boisse renforcée requise	Température de la base	Température du plateau	Imprimable sur la feuille à recouvrement poudré	Imprimable sur feuille lisse (PEI)	Imprimable sur une feuille satinée	Soluble avec la plupart des solvants	Température de déflexion thermique	Résistance à l'impact Charpy	Résistance à la traction	Prix
PLA	Non	Non	Non	210 - 215 °C	80 °C	✓	✓	✓	✗	100-150	10-15	10-15	10-15
PETG	Non	Non	Non	230 - 270 °C	90 °C	✓	avec de la colle en bilaminé	✓	✗	150-180	15-20	15-20	15-20
PETG HT	Non	Non	Non	270 °C	110 °C	✓	avec de la colle en bilaminé	✓	✗	200-220	20-25	20-25	20-25
ASA	Oui (recommandé)	Non	Non	260 - 285 °C	95 - 110 °C	avec de la colle en bilaminé	avec de la colle en bilaminé	✓	✓	180-200	18-22	18-22	18-22
ABS	Oui (recommandé)	Non	Non	240 - 255 °C	110 °C	avec de la colle en bilaminé	avec de la colle en bilaminé	✓	✓	160-180	16-20	16-20	16-20
PC (Polycarbonate)	Oui (recommandé)	Non	Non	270 - 275 °C	115 °C	avec de la colle en bilaminé	avec de la colle en bilaminé	✓	✗	220-240	22-26	22-26	22-26
CPE	Non	Oui	Non	275 °C	90 °C	✓	avec de la colle en bilaminé	✓	✗	180-200	18-22	18-22	18-22
PVA / BVOH	Non	Oui	Non	195 - 215 °C	80 °C	✓	✓	✓	✓	100-120	10-12	10-12	10-12
HIPS	Non	Non	Non	220 °C	110 °C	✓	✓	✓	✓	150-170	15-18	15-18	15-18
PP (Polypropylène)	Oui	Non	Non	220 °C	100 °C	✗ (non recommandé)	avec de la colle en bilaminé	✓	✗	120-140	12-14	12-14	12-14
Flex	Non	Oui	Non	230 - 260 °C	50 - 85 °C	✓	avec de la colle en bilaminé	avec de la colle en bilaminé	✗	100-120	10-12	10-12	10-12
nGen	Non	Non	Non	240 °C	90 °C	✓	avec de la colle en bilaminé	✓	✗	180-200	18-22	18-22	18-22
Nylon	Oui (recommandé)	Oui	Non	250 - 270 °C	75 - 90 °C	avec de la colle en bilaminé	non recommandé	avec de la colle en bilaminé	✗	150-170	15-18	15-18	15-18
Composite materials	-	-	Oui	240 - 285 °C	75 - 110 °C	-	-	-	✗	180-200	18-22	18-22	18-22
Wood / metal filled	Non	Non	-	190 - 220 °C	80 °C	✓	✓	✓	✗	100-120	10-12	10-12	10-12
PVB	Non	Non	Non	245 °C	75 °C	✗ (non recommandé)	✓	✓	✓	100-120	10-12	10-12	10-12

Comparaison des matériaux

4.9. Comment choisir un matériau ?

Pour choisir un matériau, en dehors des critères esthétiques, il y a plusieurs caractéristiques à prendre en compte, les plus importantes étant souvent celles-ci :

- ses propriétés mécaniques, notamment sa limite élastique (limite à partir de laquelle le matériau subira une déformation irréversible) et sa limite à la rupture (limite à partir de laquelle le matériau se casse),

- sa résistance thermique,
- la résistance aux produits chimiques,
- la résistance aux conditions extérieures (UV, hygrométrie...),
- sa compatibilité alimentaire.

Ce tableau recense les principaux critères de choix d'un matériau :

Comment choisir un procédé

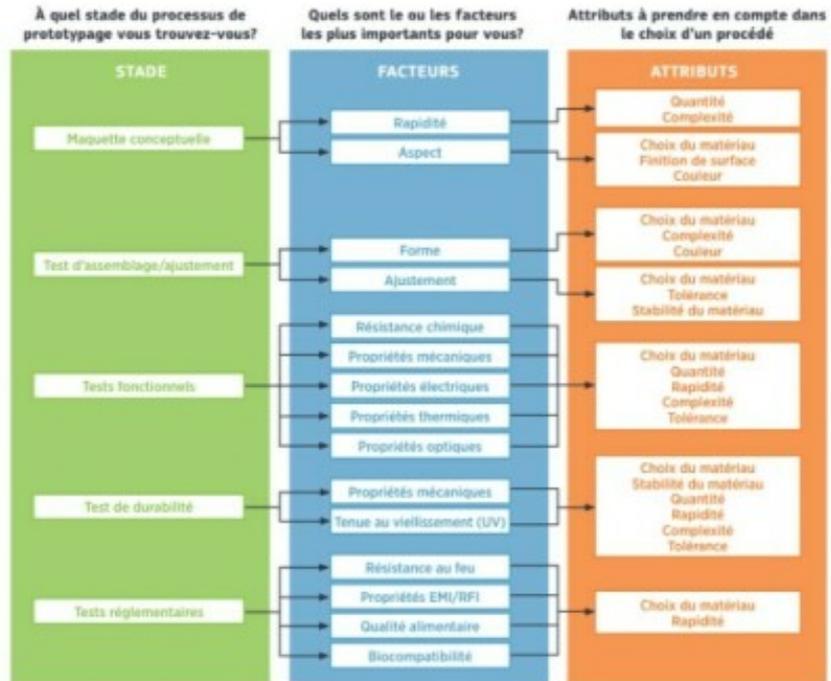
Afin de déterminer le procédé qui convient le mieux à votre projet, utilisez les outils ci-après.

Étape 1:

Utilisez d'abord l'arbre de décision à droite pour déterminer les facteurs présentant le plus d'importance pour vous en fonction du stade du processus de prototypage auquel vous vous trouvez, et en vous référant aux définitions de la page 8 le cas échéant.

Étape 2:

Sur la base des attributs recommandés pour votre ou vos facteur(s) les plus importants identifiés à l'étape 1, comparez les procédés à l'aide de la matrice de la page 8 afin de déterminer le processus le mieux adapté à votre projet.



Critères de choix des matériaux

5. Bonnes pratiques de l'impression 3D

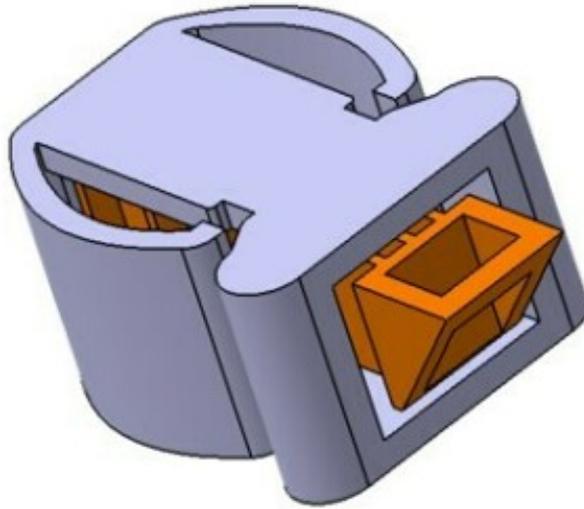
Procédure : Réaliser une impression 3D

- 1** Il faut dans un premier temps posséder un modèle 3D des pièces à fabriquer qui peut être obtenu ainsi :
 - Modéliser la pièce dans un logiciel de CAO (Conception Assistée par l'Ordinateur),
 - Numériser une pièce existante avec un scanner 3D et reconstruire la pièce à l'aide d'un logiciel spécialisé,
 - Récupérer la pièce sur un site de partage de modèles 3D tel que Thingiverse, YouMagine, Shapeways ou Sculpteo.
- 2** Transformer la pièce en format STL (format inventé pour la STereo-Lithography qui historiquement était le premier procédé d'impression 3D industriel).
- 3** L'ouvrir dans un logiciel de pré-traitement appelé slicer qui va découper le modèle en couche et construire les supports nécessaires à son impression dans de bonnes conditions.
- 4** Régler et optimiser les paramètres d'impression.
- 5** Générer le fichier G-code qui sera lu par la machine.
- 6** Lancer l'impression après avoir éventuellement réglé la machine.

Bonnes pratiques de conception 3D

Pour obtenir de bons résultats d'impression 3D, il faut respecter quelques règles de bonnes pratiques :

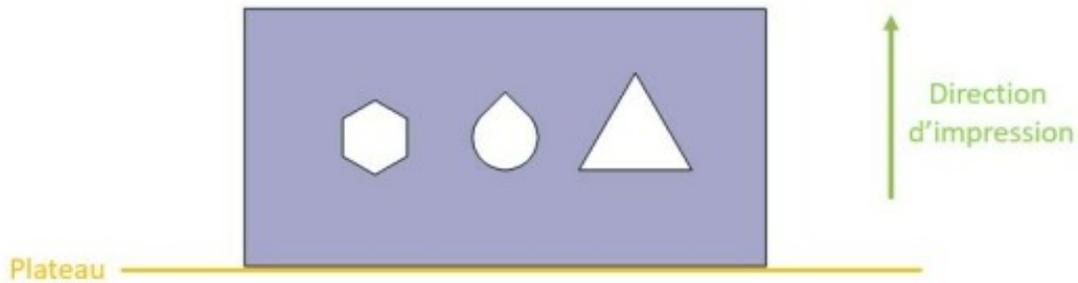
- Evitez d'avoir recours à des supports (pas d'angle à moins de 40° ou de surface en porte à faux), construisez vous-même vos supports si nécessaire pour gagner du temps en post production (ébavurage/ponçages pénibles et imparfaits, à éviter !). De manière générale, concevez vos modèles 3D pour éviter à tout prix d'avoir recours à des supports car ils altèrent la qualité des surfaces et sont parfois difficiles à retirer, une bonne pièce est une pièce utilisable directement en sortie de machine sans avoir à effectuer de retouche manuelle,
- Par exemple dans la pièce dessous, le support a été modélisé en 3D (pièce orange) pour facilement l'extraire après impression sans avoir à gratter au cutter, la pièce orange est en « lévitation » afin d'éviter qu'elle ne « colle » trop à la pièce, vous pouvez laisser trois épaisseurs de couche vide entre les surfaces, la matière s'appuiera dessus mais ne collera pas :



Construisez vos propres supports d'impression extractibles

- Imprimez des parois dont l'épaisseur est un multiple de la largeur de buse,
- Imprimez des hauteurs égales à un multiple de l'épaisseur des couches pour une bonne précision dimensionnelle et un bon état de surface,
- Utilisez une épaisseur minimale égale à 2 fois l'épaisseur des couches,
- N'exportez jamais (au format « stl » par exemple) un assemblage de pièces car l'orientation 3D de chaque pièce ne pourra pas être traitée indépendamment ce qui vous empêchera d'optimiser le positionnement et l'orientation des pièces pour éviter les supports,
- Préférer un taux de remplissage supérieur à 20% pour une meilleure qualité des couches supérieures
- Si le plastique utilisé à un fort « warping » (distorsion), évitez une base de surface faible ou utilisez du scotch au Kapton (polymère) ou déposez de la colle lavable en stick ou en bombe ou placez vous-même dans le modèle 3D des « pastilles » de 2 couches d'épaisseur aux extrémités de vos pièces pour évitez leur décollement (les logiciels de pré-traitement peuvent rajouter de la matière sur le côté de vis pièces pour éviter ce phénomène mais en place souvent trop et il faudra ensuite les retirer au cutter, ce qui altère la qualité du résultat),
- Faites des essais en faisant varier la température de la matière que vous utilisez. Chaque fabricant et chaque matière ont des caractéristiques qui peuvent différer pour un même matériau,
- Pour mieux contrôler la qualité d'impression, placez la machine dans une salle à température et hygrométrie contrôlées. Utilisez des imprimantes avec des enceintes fermées ou fermez les vous-même, un simple carton suffit !,
- Evitez de faire passer des efforts cisailant entre deux couches : cela provoque un risque d'amorce de rupture,
- Evitez les filetages et taraudages de petites dimensions, les matériaux d'impression 3D sont fragiles et peu précis en faible dimension,

- Les perçages accueillant des vis n'ont pas besoin d'être cylindriques, vous n'utilisez pas de foret ou de mèche pour les réaliser, pensez « impression 3D » ! Les solutions ci-dessous donnent de meilleurs résultats car aucune surface ne nécessite de support (ces trois trous peuvent accueillir le même axe) :



Evidemment pour accueillir des vis

- Pour réaliser des montages par vissage : insérer des écrous dans vos pièces ou des inserts métalliques ou utilisez des vis à bois montées dans des trous cylindriques de diamètre légèrement supérieur au diamètre au fond de filet :



Inserts métalliques : la solution pour visser efficacement dans des polymères

Les problèmes et les solutions lors des impressions 3D

Une première impression 3D se passe rarement bien, il est fréquent que la pièce ait des imperfections, ne serait-ce que mineures qui peuvent être corrigées par de bons réglages lors du pré-traitement.

Ce site, véritable mine d'or, recense la majorité des solutions aux problèmes les plus fréquents : Les solutions à vos problèmes d'impression [\[https://www.grossiste3d.com/content/27-identifier-et-corriger-les-defauts-d-impression?gclid=CjwKCAiAs92MBhAXEiwAXTi257i1QkahryJsRnCYXa19VJeIDd5AKEKds_Ui5yICD18WgheqLJdmSBoCdOEQAvD_BwE\]](https://www.grossiste3d.com/content/27-identifier-et-corriger-les-defauts-d-impression?gclid=CjwKCAiAs92MBhAXEiwAXTi257i1QkahryJsRnCYXa19VJeIDd5AKEKds_Ui5yICD18WgheqLJdmSBoCdOEQAvD_BwE)

[\[https://www.grossiste3d.com/content/27-identifier-et-corriger-les-defauts-d-impression?gclid=CjwKCAiAs92MBhAXEiwAXTi257i1QkahryJsRnCYXa19VJeIDd5AKEKds_Ui5yICD18WgheqLJdmSBoCdOEQAvD_BwE\]](https://www.grossiste3d.com/content/27-identifier-et-corriger-les-defauts-d-impression?gclid=CjwKCAiAs92MBhAXEiwAXTi257i1QkahryJsRnCYXa19VJeIDd5AKEKds_Ui5yICD18WgheqLJdmSBoCdOEQAvD_BwE)

6. La découpe laser

Le découpage laser est une technique soustractive qui consiste à graver de nombreux matériaux et de découper des plaques d'épaisseur constante grâce à un laser.

Cette technique peut découper et graver différents types de matériaux comme le bois, le plastique, le carton et graver le verre.

Le laser utilisé est précis et ne nécessite pas de source de forte puissance car la lumière est concentrée sur une toute petite surface du matériau. La focalisation du faisceau du laser, permet de chauffer la matière jusqu'à sa fusion ou sa vaporisation. La taille du rayon laser est approximativement de 0,5 mm.

Très souvent la découpe laser est guidée par ordinateur pour tracer le chemin de découpe.

Un peu d'histoire

Le laser est l'abréviation des mots anglais Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Le principe est de dévier un électron de son orbite vers une orbite plus élevée. L'électron tendant à revenir naturellement à son niveau initial, il restitue l'énergie absorbée sous forme d'un rayonnement lumineux appelé photon. Le laser utilise une propriété de l'atome qui est l'inversion de population. Cette propriété fût découverte en 1917 par le Physicien Albert Einstein. Elle reste alors Théorique. Il faudra attendre 50 ans pour trouver une application à cette Théorie. C'est en 1960 que le physicien Théodore Maiman obtient le premier LASER avec un rubis. En 1967, Peter Holcroft découpe une plaque d'acier inoxydable de 2,5 mm d'épaisseur à une vitesse de 1 m/min, sous dioxygène avec un laser CO₂ de 300W et conçoit la première tête de découpe.

Les types de découpe laser

Il existe différents types de découpe laser, en voici les principales :

Le laser au CO₂

Le laser CO₂ est issu d'un mélange gazeux de CO₂, d'azote et d'hélium qui est ionisé par un courant électrique permettant l'excitation de celui-ci. Le CO₂ est le gaz qui crée le phénomène. L'azote est le gaz permettant cette réaction, l'hélium lui est utilisée pour refroidir le mélange. La puissance d'un LASER CO₂ est proportionnelle à la longueur d'ionisation et à la vitesse de circulation des GAZ.

Le laser YAG

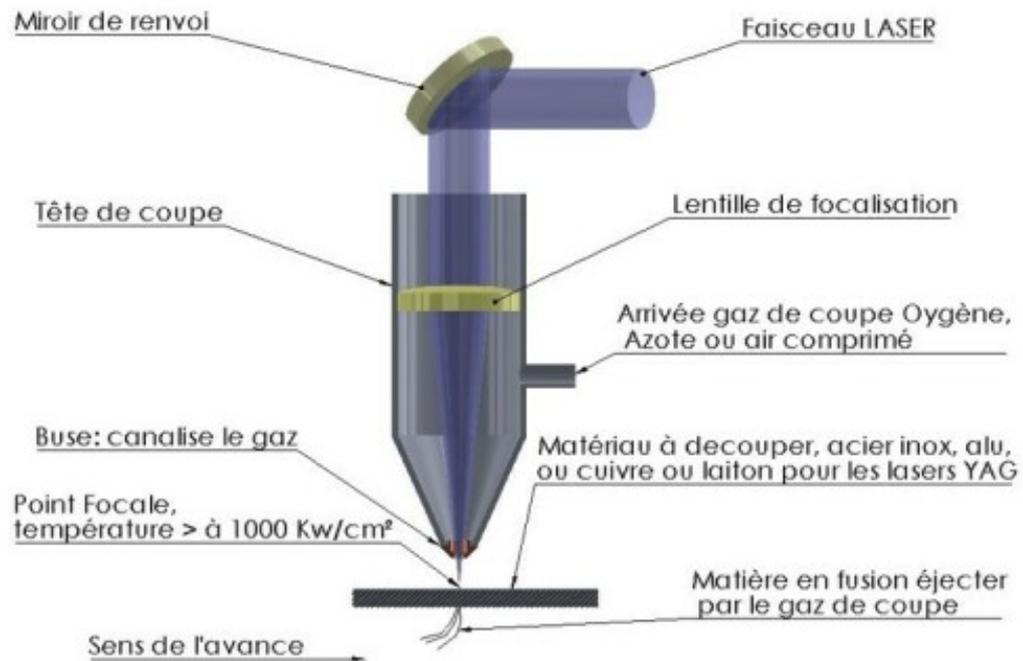
Le laser YAG ou Grenat d'Yttrium et d'Aluminium est issu de l'excitation d'un cristal de synthèse par un courant électrique ou une source lumineuse. L'avantage du YAG est qu'il est conductible par fibre optique. Il est idéal pour les applications de soudure robotisée.

Le laser à fibre optique

Le laser à fibre est issu de l'excitation d'une fibre de verre dopée par le biais de terres rares (l'ytterbium,

l'erbium, le néodyme, le praséodyme, l'holmium, le dysprosium et le thulium). Lorsque des photons sont émis, ils sont confinés à l'intérieur de ce noyau de fibre dopée, ce qui amplifie la puissance du laser émis.

Principe



Principe de la découpe laser

Complément

Pour plus d'informations sur ces trois techniques : La découpe laser [\[https://www.decoupe-laser-plier.com/decoupe-laser.html#:~:text=t%C3%AAt%20de%20d%C3%A9coupe.-,Laser%20CO2,utilis%C3%A9%20pour%20refroidir%20le%20m%C3%A9lange.\]](https://www.decoupe-laser-plier.com/decoupe-laser.html#:~:text=t%C3%AAt%20de%20d%C3%A9coupe.-,Laser%20CO2,utilis%C3%A9%20pour%20refroidir%20le%20m%C3%A9lange.)

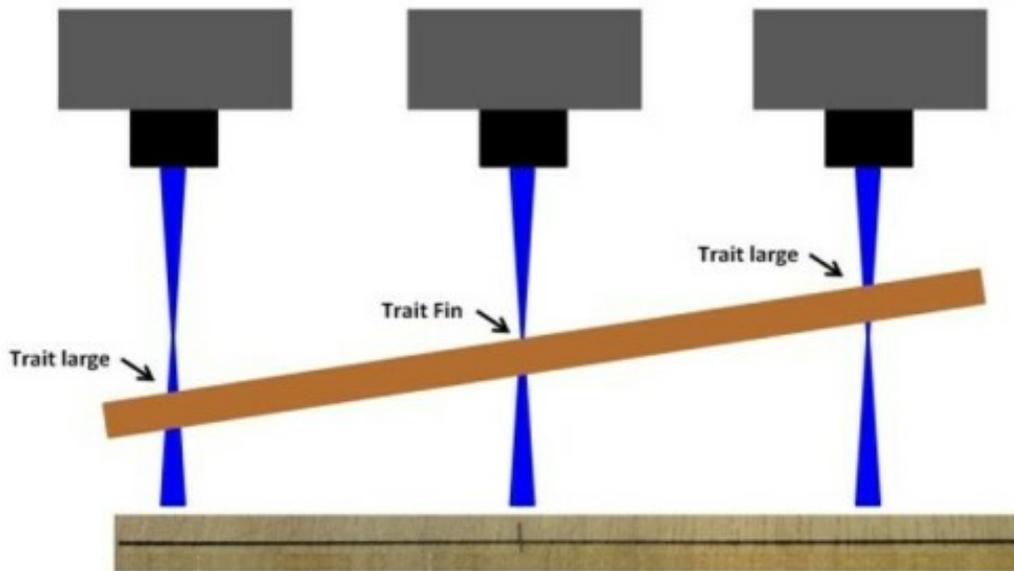
Ces techniques ne permettent pas de découper le verre avec un laser, mais d'autres technologies plus récentes à base de faisceaux de BESSEL le peuvent : Découpe laser du verre [\[https://amplitude-laser.com/fr/news/decoupe-de-verre-structure-spatiale-et-temporelle-avancee-pour-la-decoupe-de-verre/#:~:text=Les%20impulsions%20ultracourtes%20combinant%20des,toute%20la%20largeur%20du%20verre.\]](https://amplitude-laser.com/fr/news/decoupe-de-verre-structure-spatiale-et-temporelle-avancee-pour-la-decoupe-de-verre/#:~:text=Les%20impulsions%20ultracourtes%20combinant%20des,toute%20la%20largeur%20du%20verre.)

La focale de la découpe laser

La focale est la distance qui sépare la lentille convergente du foyer. Ce dernier correspond à un point unique où l'ensemble des rayons convergent. Les rayons lasers concentrés chauffent le point à tel point que la matière s'évapore. La découpe est plus performante quand ce point de foyer arrive au milieu de l'épaisseur de la plaque, c'est pourquoi il est toujours nécessaire de régler cette hauteur de focale avant de lancer la découpe. Si la focale est trop haute ou trop basse par rapport à la plaque la largeur de coupe sera d'autant plus importante que l'écart est grand par rapport à la focale idéale. De plus, les

bords de coupe seront également fortement biseautés.

Principe de focale :



Réglage de la focale

Les matières organiques compatibles

Les matériaux compatibles avec ce procédé sont les suivants :

- Les plastiques : ABS (acrylonitrile butadiène styrène), Acrylique ou PMMA (polyméthacrylate de méthyle), caoutchouc, PA (polyamide), PBT (polytéréphtalate de butylène), PC (polycarbonate), PE (polyéthylène), PET (polyéthylène téréphtalate), PI (polymide), POM (polyoxyméthylène), PP (polypropylène), PPS (sulfure de polyphénylène), PS (polystyrène), PUR (polyuréthane) et mousses sans PVC.
- les autres matériaux : bois, papier (blanc ou coloré), aliments, cuir, tissu, carton et liège.

Attention : il ne faut jamais découper au laser des matériaux à base de chlore tel que le PVC car cela peut libérer des gaz très toxiques et peut aussi endommager la machine car c'est une molécule très oxydante.

Réaliser un projet avec une découpe-laser

- Première méthode : à partir d'un logiciel de CAO

Pour commencer, il faut réaliser un modèle 3D avec n'importe quel logiciel de modélisation 3D puis réaliser une mise en plan. Quand cela est fait, il faut enregistrer le fichier sous format DXF. Après cette première partie, il faut importer le fichier dans un logiciel de pré-traitement et définir les paramètres de coupe. Puis il faut charger le fichier dans la machine, placer la plaque, placer la tête de coupe à hauteur de focale de la surface, définir le point de départ et lancer la découpe.

- Deuxième méthode : avec un outil de dessin

Il suffit juste de dessiner directement le contour et de reprendre les étapes de la première méthode à partir de la définition des paramètres de coupe.

A noter qu'il faut laisser le film protecteur des plaques de plastique sur les deux faces : le dessus permet d'éviter le voile blanc lié au dépôt des vapeurs de matière et le dessous permet de protéger des éventuelles flammes.

7. Les scanners 3D

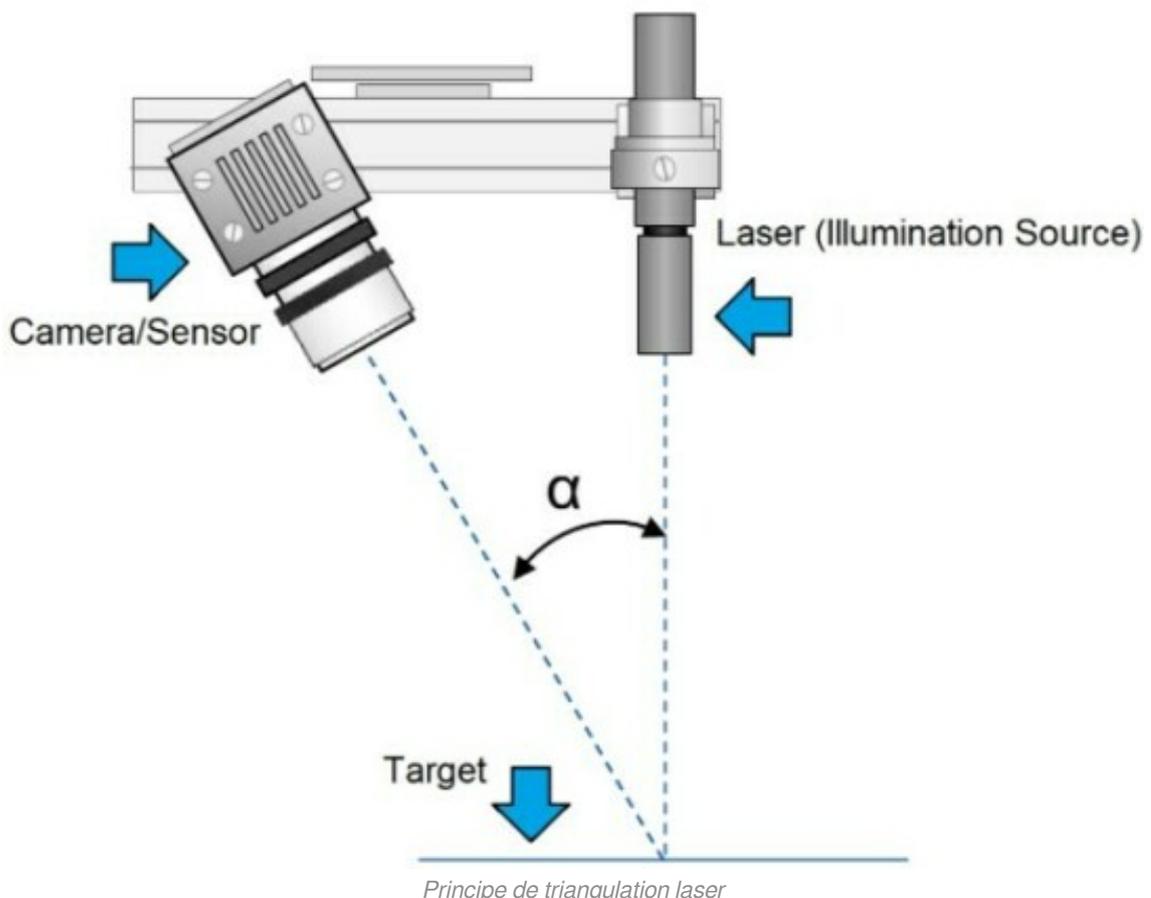
La numérisation 3D est utile pour réaliser des modèles 3D à partir de pièces de géométries complexes pouvant difficilement être relevées par des moyens de métrologie standards.

Les scanners 3D fonctionnent avec des technologies optiques combinées à des lasers pour obtenir des images 3D sous forme de nuage de points qu'il faut ensuite exploiter pour reconstruire les surfaces du modèle 3D dans des logiciels spécialisés. Ces appareils utilisent généralement une caméra pour relever les couleurs et textures de l'objet et un laser pour obtenir les coordonnées en 3D de chaque point géométrique de la pièce.

Les principes de numérisation 3D

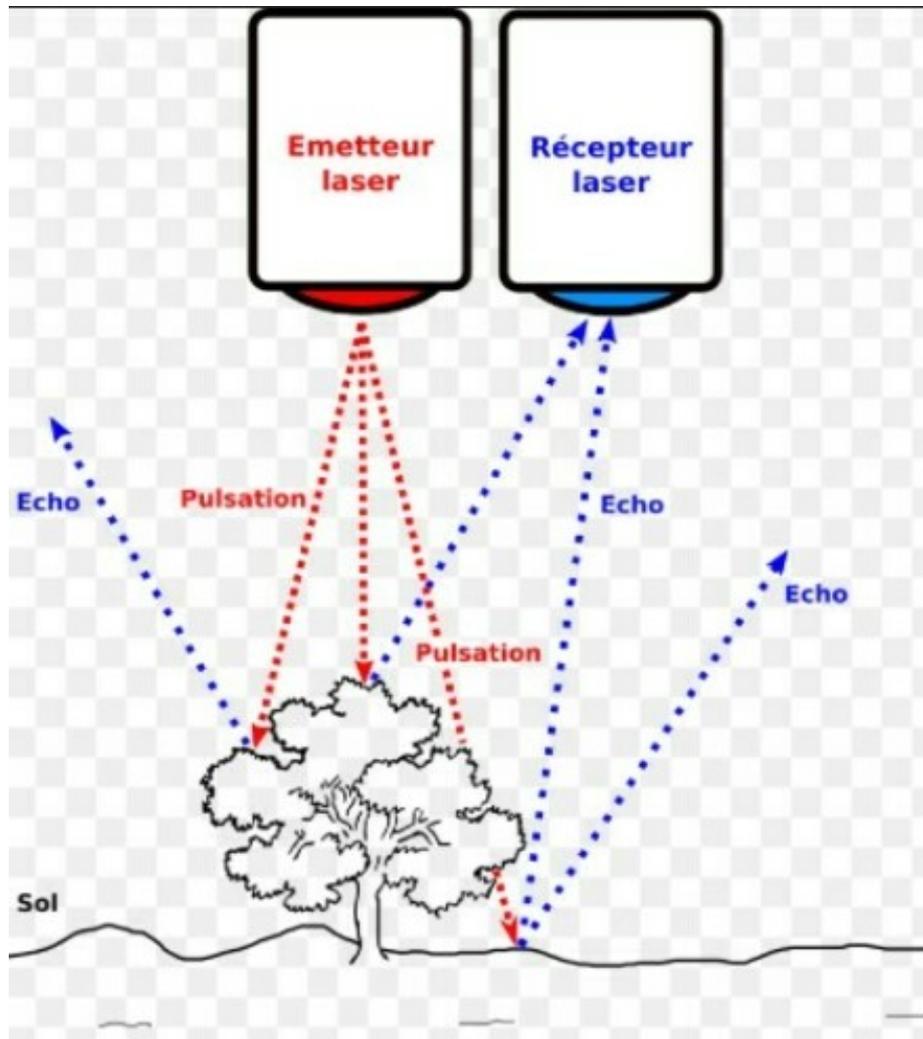
Le principe de triangulation laser :

La triangulation combine une mesure de distance et un calcul angulaire. Un émetteur projette un point laser sur un objet à mesurer. La lumière réfléchie atteint sous un certain angle un récepteur et la distance est calculée à partir du temps de vol (temps d'aller/retour) et de la vitesse de la lumière. C'est une technique très précise mais qui ne fonctionne pas pour les surfaces brillantes ou transparentes.



L'impulsion laser ou la numérisation 3D par temps de vol

L'impulsion laser est une technique de mesure à distance fondée sur l'analyse des propriétés d'un faisceau de lumière renvoyé vers son émetteur. Cela est basé sur le calcul de la durée mise par le laser pour toucher une surface et revenir. Elle peut être aussi nommée LiDaR pour Light Detection and Ranging.



Principe de la mesure par temps de vol

La photogrammétrie

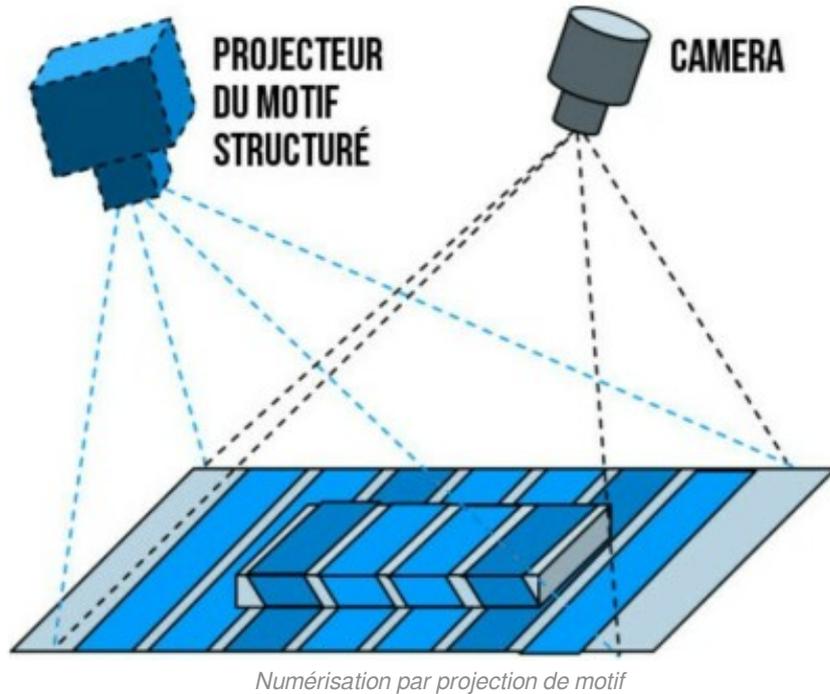
La photogrammétrie consiste à prendre plusieurs angles de vue d'un objet pour le reconstruire en 3D. Les photographies peuvent prendre les proportions correctement. Elle est très utilisée pour les grands objets ou scènes. Cette technique est rapide, mais peu précise.

Numérisation 3D par contact

Les mesures par contact se font à l'aide d'un palpeur ou d'une sonde. Ce procédé est d'une grande précision et peut relever des surfaces réfléchissantes ou transparentes. Par contre c'est un procédé assez lent et inadapté aux formes très complexes ou aux matériaux souples.

Numérisation par lumière structurée

Cette technique projette un motif lumineux structuré en lumière infrarouge ou visible et relève sa déformation par le biais d'un capteur photo. Le calcul de la déformée permet au logiciel de reconstituer les volumes 3D. Ce procédé est rapide et plus précis que la photogrammétrie mais moins que la triangulation laser ou la mesure par contact.



Glossaire

Fabrication additive	La fabrication additive consiste à ajouter de la matière (impression 3D, injection plastique, roto-moulage, etc.). En ce qui concerne l'impression 3D, l'ajout de matière est très souvent réalisée en couche par couche d'épaisseurs constantes.
Fabrication soustractive	La fabrication soustractive consiste à retirer de la matière comme par exemple avec le tournage et le fraisage.