

# Conception de solide par impression 3D

Fabien Baillon

19 mars 2024

Attribution - Partage dans les Mêmes Conditions : <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/fr/>



# Table des matières

- Introduction
- Procédés de fabrication additive
- Processus de fabrication par impression 3D
- Place de l'impression 3D dans l'industrie : industrie du futur ?
  - Quelques repères chronologiques
  - Vers de nouveaux usages : prototypage, outillage ou production.
- L'impression 3D des médicaments
- Glossaire
- Webographie
- Crédits des ressources



# 1. Introduction

Ce cours va aborder les techniques d'impression 3D pour le développement de produits par un processus de fabrication additive.

L'impression 3D consiste à fabriquer un objet en construisant des couches d'épaisseur millimétrique d'un matériau donnée (polymère, métal, pâtes).

Ce type de fabrication peut permettre la création de petites séries, de personnalisation de produit, de prototype, ou de création unique par l'utilisateur final.

Nous verrons les différentes techniques d'impression 3D les plus répandues.



## 2. Procédés de fabrication additive

Sous l'appellation de fabrication additive sont réunis différents procédés de fabrication consistant à produire un objet par l'ajout successif d'un matériau. De ce fait, elle s'oppose aux techniques traditionnelles soustractives, où l'objet prend forme par retrait de matière (par usinage).

Nous aborderons les différentes techniques existantes, ainsi que leur applications.

Ainsi, la conception est toujours réalisée couche par couche, même si le principe d'ajout de la matière peut être différent selon le procédé considéré.

On peut considérer 7 procédés de fabrication additive selon une classification reconnue internationalement (*ASTM F42* <sup>p.21</sup>) :

- l'extrusion et dépôt de fil fondu ;
- la photo-polymérisation d'une résine ;
- la fusion sur lit de poudre ;
- la projection de matière ;
- la projection de liants ;
- le laminage, ou la stratification de matériau en feuilles ;
- le dépôt direct de matière sous énergie concentrée.

Les procédés peuvent aussi être regroupés selon le principe physique engagé :

- la fusion de fil ;
- la stéréolithographie ;
- le collage de feuilles ou de poudres ;
- la fusion et le frittage de poudres.

### extrusion de matière

L'extrusion de matière est le procédé le plus utilisé (appelée *FDM* <sup>p.21</sup>, *Fused Deposition Modeling* ou *FFF*, <sup>p.21</sup> *Fused Filament Fabrication*). Il s'agit d'un procédé d'extrusion qui vient déposer, via une tête d'impression mobile, un matériau thermoplastique sur une surface. Le principe de dépôt de matière fondue permet de s'adresser à de nombreux matériaux thermoplastiques, biomatériaux ou composites (connaissant leur température de fusion), et rend possible l'impression simultanée de plusieurs matériaux pour un même objet. La plupart du temps, le matériau initial est conditionné sous forme de fil (c'est pourquoi on parle aussi de dépôt de fil fondu), mais cela peut aussi être des granulats ou des pâtes (plus ou moins liquides). Ce large éventail de matériau fait de ce procédé un bon candidat pour les industries agro-alimentaire ou pharmaceutique.

Au delà du procédé lui-même, on peut classifier les imprimantes par extrusion de matière selon le type de mécanisme, pour le déplacement de la tête d'impression : cartésien, delta, polaire ou à bras robotique.

Le système cartésien est le plus simple. Le principe delta permet des impressions plus rapides, mais est plus consommateur de calcul pour la détermination de la trajectoire de la tête d'impression. Le système polaire, ou le plateau peut tourner en même temps que la tête se

déplace, permet aussi d'imprimer plus vite. Enfin, l'utilisation d'un bras robotique permet une totale liberté de mouvement, et est surtout adaptée à des impressions complexes de grande taille.

La tête d'impression peut être constituée d'une simple buse, ou d'une seringue rendant alors possible l'impression de matériaux spécifiques (alimentaire ou biologique par exemple).

Par ailleurs, pour des applications très spécifiques, le procédé d'extrusion peut être associé à un faisceau lumineux focalisé (LASER ou UV), pour polymériser une résine par exemple, en cours d'impression.

## **photo-polymérisation**

Le procédé d'impression 3D par photo-polymérisation (stéréolithographie ou SLA <sup>p.22</sup> pour *Stéréolithographie Apparatus*) est le plus ancien, il est basé sur la polymérisation d'une résine photosensible, par une source lumineuse focalisée, couche par couche, dans un bain de résine. De part son principe, il permet la fabrication de pièces présentant des détails très fins, et un état de surface totalement lisse.

Ce procédé est particulièrement adapté pour l'impression de petit objet (voire nanométrique), nécessitant une grande finesse de détails (on peut citer des applications électroniques, dentaires, ou de joaillerie).

## **procédé par fusion de poudre**

L'impression 3D par fusion de poudre (*PBF* <sup>p.21</sup>, *Powder Bed Fusion*) est basée sur l'utilisation d'un LASER pour venir fusionner un matériau présent sous forme de poudre. Ces poudres peuvent être métalliques, plastiques ou céramiques. La poudre est déposée couche par couche (de l'ordre de 100 µm), et le laser focalisé permet le frittage localisé du matériau (impression par *SLS* <sup>p.22</sup> (*Selective Laser Sintering*). En règle générale, le lit de poudre est maintenu à une température proche de la température de fusion, et le laser apporte l'énergie nécessaire pour passer au dessus de cette température, et permettre le frittage de la poudre. L'homogénéité de la poudre est un critère important dans la conduite de ce procédé.

Lors de l'impression, la pièce est auto-portée dans le bac de poudre, ce qui permet de s'affranchir d'un matériau de support, et rend aussi possible la fabrication de plusieurs pièces indépendantes au cours d'une même impression.

## **procédé par projection de matériaux**

Le procédé d'impression par projection de matériaux consiste à pulvériser des gouttelettes de photo-polymères par des têtes d'impression qui viennent ainsi les déposer sur le plateau d'impression. Chaque couche est alors polymérisée par une source d'ultraviolet. La composition des gouttelettes peut varier en chaque point (comme lors d'une impression d'images par jet d'encre), ce qui offre une grande richesse de l'objet final du point de vue de sa composition matériel, et donc de ses propriétés d'usage.

Dans l'ensemble, cette technique est surtout adaptée à du prototypage, car la tenue dans le temps des objets produits n'est pas très bonne.

## **procédé par projection de liant**

Il s'agit de la fabrication d'un objet par stratification d'une poudre. La poudre est progressivement encollée, couche par couche, à l'aide d'un liant projeté. Le liant peut être une colle extraforte, type cyano-crylate. Comme les colles peuvent être teintées, par mélange, on peut obtenir un objet multicolore.

Dans le cas de poudres métalliques, l'impression peut être suivie d'une étape critique de frittage, pour assurer la tenue mécanique de l'objet final.

Ce procédé est intéressant économiquement, et permet l'impression d'objets de grandes tailles, mais il donne lieu à des objets dont la tenue mécanique est bien moindre de celle obtenue par fusion de poudre. De ce fait, cette technique est surtout employée pour la production de moules (en sable ou silice) pour la fonderie.

### **stratification de matériau en feuilles**

Ce procédé consiste à assembler entre-elles des feuilles de papier, de plastique ou de métaux. L'assemblage est réalisé par collage, ou par ultrasons. Après le dépôt d'une feuille, celle-ci est découpée à l'aide d'une lame ou d'un laser.

### **dépôt de matière sous énergie concentrée**

Le dépôt de matière sous énergie concentrée consiste à déposer du matériau (métal, céramique), le plus souvent à l'aide d'un bras robotisé à 4 ou 5 axes de liberté, dans un faisceau d'énergie (laser ou arc électrique) pour le faire fondre, comme lors d'une soudure. Cette étape de fabrication additive est rapide, et permet une grande liberté de mouvement de la tête d'impression, mais bien souvent grossière, elle peut alors être suivie par une étape classique d'usinage, notamment pour améliorer l'état de surface de l'objet fini.

Ce type de procédé est très peu répandu.



### 3. Processus de fabrication par impression 3D

Différentes étapes sont nécessaires pour permettre la fabrication d'un objet par impression 3D, qu'il s'agisse d'un prototype en cours de conception ou d'un produit final.

#### Méthode

Les étapes incontournables sont :

1. construction de l'objet dans un environnement de CAO <sup>p.21</sup>
2. Conversion de la conception CAO <sup>p.21</sup> au format de fichier *STL* <sup>p.22</sup>
3. Découpage en tranches du volume *STL* <sup>p.22</sup> et génération de fichier de déplacement *GCode* <sup>p.21</sup>

#### Complément

Le format *STL* <sup>p.22</sup> est le plus répandu, mais ce n'est pas le seul. On peut rencontrer aussi des fichiers de modélisation au format *OBJ* <sup>p.21</sup>. Ce format est plus lourd, mais permet une plus grande précision de rendu, car la surface est décrite par différentes formes polygonales (contrairement au *STL* <sup>p.22</sup> qui n'utilise que des triangles). Par ailleurs, les fichiers *OBJ* <sup>p.21</sup> comportent des informations descriptives complémentaires (matériaux, textures, couleurs).

Différents logiciels de CAO <sup>p.21</sup> existent et permettent plus ou moins facilement de concevoir des objets 3D pour la fabrication additive.

On peut citer notamment *OpenSCAD* <sup>p.23</sup>, qui permet de construire un objet par association de primitives, via un langage descriptif proche d'un langage de programmation.

#### Exemple

Nous prenons comme exemple un objet simple, ici défini par l'association (union et différence) de primitives géométriques.

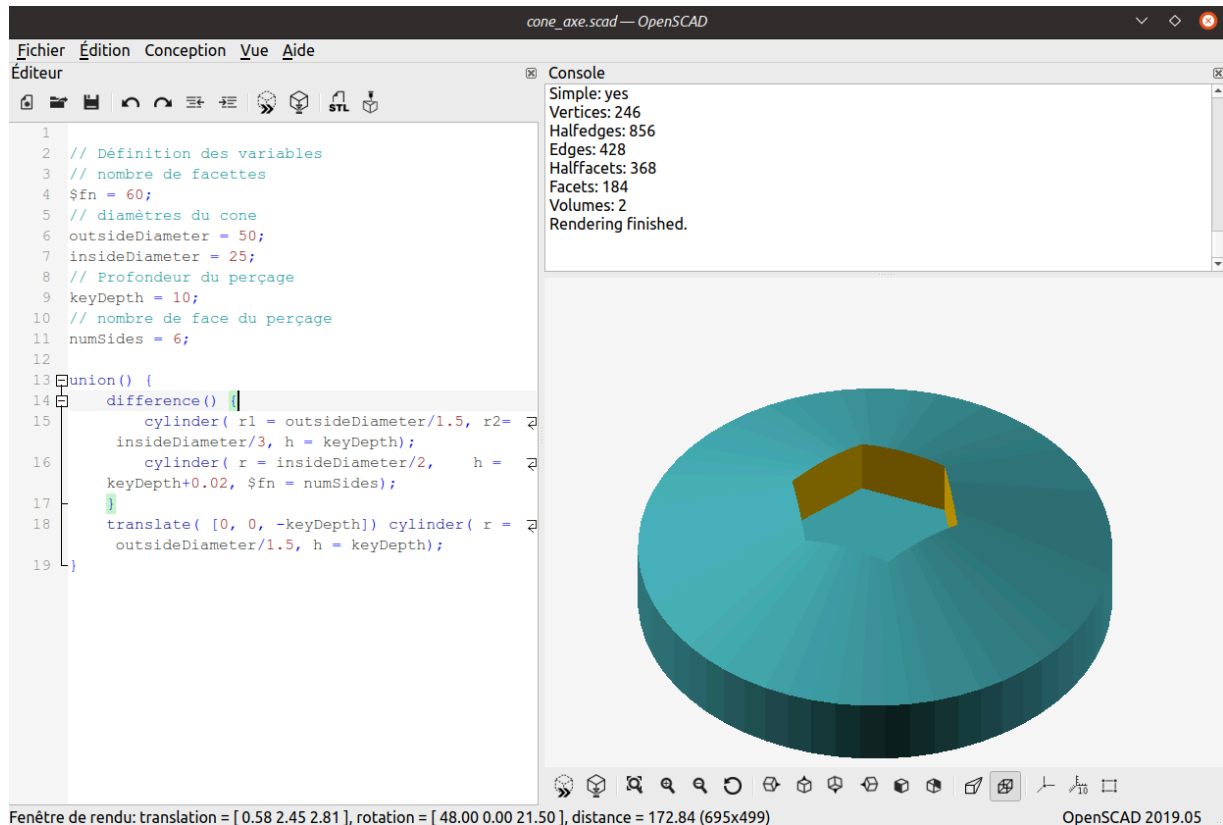
```
// Définition des variables
// nombre de facettes
$fn = 60;
// diamètres du cône
outsideDiameter = 50;
insideDiameter = 25;
// Profondeur du perçage
keyDepth = 10;
// nombre de face du perçage
numSides = 6;
```

```

union() {
  difference() {
    cylinder( r1 = outsideDiameter/1.5, r2= insideDiameter/3, h = keyDepth);
    cylinder( r = insideDiameter/2, h = keyDepth+0.02, $fn = numSides);
  }
  translate( [0, 0, -keyDepth]) cylinder( r = outsideDiameter/1.5, h = keyDepth);
}

```

Code de programmation d'un objet 3D par OpenSCAD



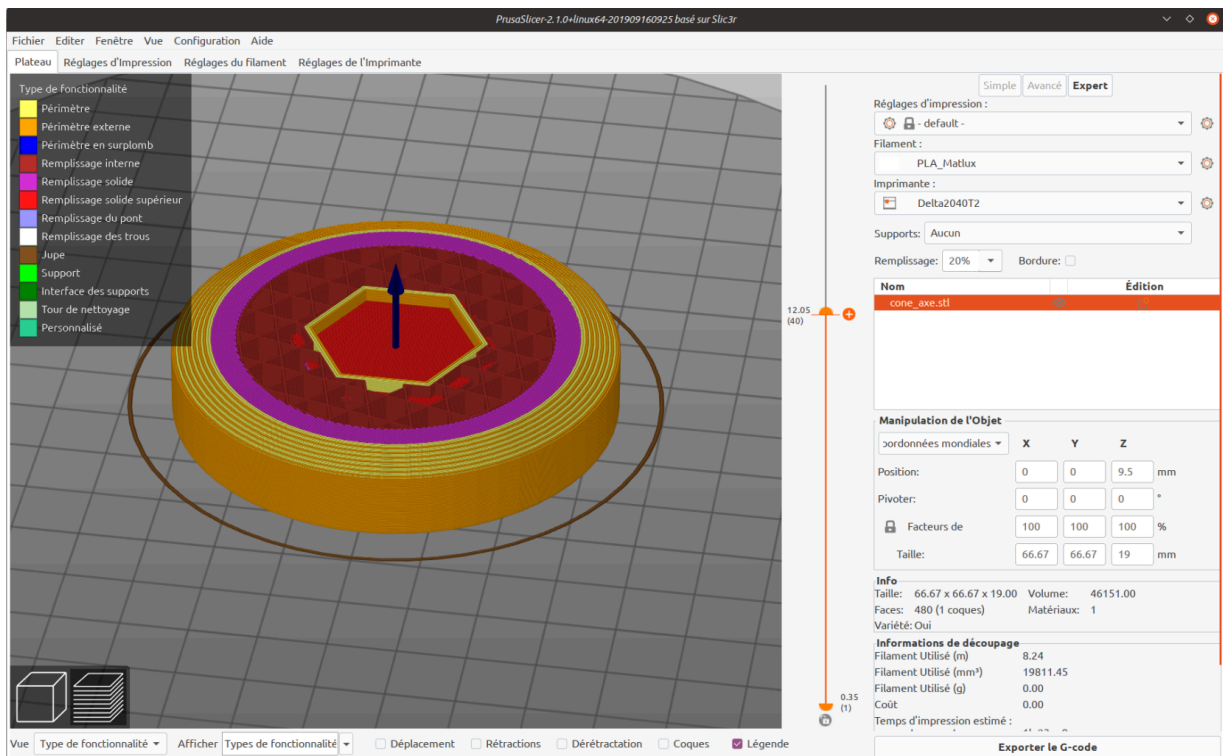
Exemple de la conception d'un objet 3D avec OpenSCAD

 Exemple

OpenSCAD<sup>OpenSCAD p.23</sup> permet de générer le fichier STL<sup>p.22</sup> correspondant à cet objet.  
(cf. fichier STL d'un objet 3D[stl])

La description géométrique en STL peut être importée dans un logiciel de tranchage, tel que PrusaSlicer<sup>PrusaSlicer p.23</sup> (basé sur Slic3r<sup>Slic3r p.23</sup>).

Exemple

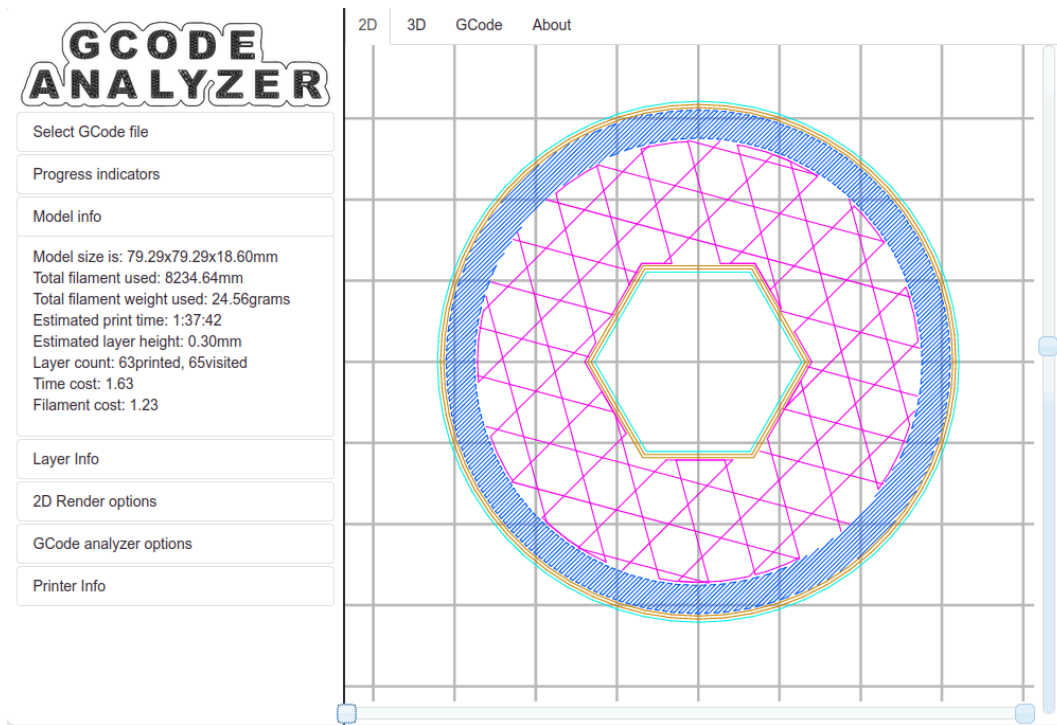


Capture du tranchage d'un objet 3D

Le logiciel de tranchage (ici *Slic3r*<sup>Slic3r p.23</sup>) permet aussi de choisir le taux de remplissage de l'objet, et l'impression d'un support ou d'un filet d'initialisation.

Dans cet exemple, en marron est matérialisé un contour externe permettant d'assurer un bon débit de matière avant l'impression de l'objet, en jaune les zones à forte densité correspondent à des faces externes, alors que les zones en violet correspondent à des zones internes, de plus faible densité.

Exemple



Prévisualisation du déplacement de la tête d'impression 3D, selon le fichier de commande gCode

La tête d'impression de l'imprimante 3D va se déplacer selon les mouvements décrits dans le fichier GCode <sup>p.21</sup>. Dans cet exemple, la couleur est indicative, et elle représente le débit de matière (en  $\text{mm}^3/\text{s}$ ). La prévisualisation a été réalisée sur GCode Viewer <sup>GCode Viewer p.23</sup>.

## 4. Place de l'impression 3D dans l'industrie : industrie du futur ?

### 4.1. Quelques repères chronologiques

Historiquement, la stéréolithographie est la première technique d'impression 3D (premier brevet en 1984).

Le premier brevet pour la *FDM*<sup>p.21</sup> date de 1992. Ces premiers brevets conduisent à la commercialisation de plusieurs imprimantes, destinées à l'industrie, pour le prototypage rapide, ou la création de moulage et outillage industriels.

La démocratisation grand public aura lieu en 2009, où l'expiration du premier brevet *FDM*<sup>p.21</sup> permettra la naissance de projet de recherche *RepRAP*<sup>p.22</sup> (*Replicating Rapid Prototyper*). L'imprimante 3D développée dans ce cadre permettra un véritable essor de l'impression 3D par extrusion de matière, car elle est de conception simple, facile à assembler, constituée de pièces mécaniques accessibles au grand public. Par ailleurs, l'équipe de recherche décide de diffuser l'ensemble de la documentation sous licence libre (*GNU*<sup>p.21</sup>, *General Public License*). La communauté libre de l'impression 3D grand public est née de là. Le développement des FabLabs va aussi favoriser l'exploitation de cette opportunité qu'offre l'*open source hardware*, et participer activement à la formation des particuliers et la diffusion de l'impression 3D.

De nos jours, dans des configurations extrêmes, l'impression 3D par stéréographie permet d'atteindre la limite de résolution de 100 nm, pour un objet de taille inférieure à 100 µm. Cela peut avoir un intérêt dans des applications très spécifiques, mais pas pour un usage courant industriel.

En dépôt de matière fondue, qui reste à ce jour le procédé le plus répandu, la résolution est plutôt entre 100 et 600 µm, pour des objets de 10 mm à 1 m de taille caractéristique.

Les deux axes d'amélioration qui doivent être pris en compte pour une utilisation industrielle courante et variée est l'impression multi-matériaux et multi-échelles.

Plus récemment, des travaux de recherche parlent d'impression 4D. Il s'agit d'assemblage de matière 3D qui s'adaptent au cours du temps (la 4<sup>ème</sup> dimension). Le terme de "**matière programmable**" peut aussi être rencontré. La modification de forme de l'objet 3D peut être provoquée par un stimulus spécifique (chaleur, solvant, pH, lumière, champs électromagnétique).

### 4.2. Vers de nouveaux usages : prototypage, outillage ou production.

L'utilisation à domicile de l'impression 3D ou dans un cadre associatif, pour créer de petits objets du quotidien, pour reproduire une pièce ménagère défectueuse ou adapter une pièce à un usage spécifique, est déjà une réalité. Cela préfigure l'émergence de micro-usine locale, répondant à un besoin (simple) identifié.

D'un point de vue industriel, de la même manière, on peut s'attendre à l'émergence d'une fabrication décentralisée et relocalisée au plus près de l'utilisateur final. L'impression 3D passera alors du statut de méthode de prototypage, à celui de méthode de production. L'usine du future produira à la demande, et au plus près du consommateur final. L'impression 3D peut dans certains cas favoriser la relocalisation de la production.

Au départ, surtout vue uniquement comme un outil de prototypage, les usages de l'impression 3D se sont diversifiés :

- prototypage rapide ;
- réalisation à la demande de moules ou d'outillage ;
- productions de petites séries de pièces commercialisées.

## **Prototypage**

Le prototypage est l'usage le plus répandu de l'impression 3D. La fabrication additive permet la réalisation rapide de prototypes, à différentes échelles, avec différents niveaux de détails, pour un coût relativement modeste. Il est aisé d'adapter le prototype en cours de conception, sans que cela remette en cause les outils de production du prototype. Ainsi, une fois l'investissement de départ réalisé, la conception d'un produit peut être réalisée dans un processus itératif, en multipliant les prototypes pour tester de nouvelles idées, dans des délais raisonnables, sans nouvel investissement.

## **Production des outillages industriels**

En milieu industriel, l'impression 3D par extrusion a déjà trouvé sa place pour la réalisation d'outillages spécifiques. En effet, le faible coût, la facilité de mise en œuvre et les performances des pièces produites permettent d'utiliser ce type de fabrication additive, à la demande et au sein même du site industriel. Cela concerne surtout des petits outillages spécifiques, des gabarits de montage ou de vérification de pièces, etc.

La fabrication de moules pour l'outillage, de petites séries, profite aussi des possibilités offertes par l'impression 3D, rendant possible des formes complexes, difficilement réalisable par les méthodes traditionnelles de fabrication. Par exemple, des canaux de refroidissement peuvent être intégrés dans la conception des moules, pour favoriser le refroidissement des pièces qui y seront ensuite injectées.

## **Production de petites séries**

L'impression 3D trouve aussi sa place pour la fabrication d'objets en petites séries, notamment pour la personnalisation dans le secteur automobile.

En aéronautique, de plus en plus de pièces finales sont fabriquées par méthode additive, où la structure alvéolaire du remplissage des pièces permettent de réduire considérablement la masse des objets produits, tout en maintenant leur résistance mécanique.

Dans les domaines de la joaillerie, du luxe ou de la mode, des produits de consommation fabriqués par impression 3D commencent à apparaître. Cela s'explique par les possibilités de personnalisation ou de formes complexes qu'offrent ce procédé de fabrication.

Certains industriels de l'électroménager notamment prennent le tournant de l'impression 3D, en imprimant à la demande certaines de leurs pièces détachées de leurs appareils, ce qui réduit les coûts de stockage de ces pièces, tout en répondant à l'obligation de fournir à leurs clients les pièces détacher si nécessaire.

Dans le secteur médical, la production de petites séries est poussée à l'extrême, puisque l'atout principale de l'impression 3D est la possibilité de produire à façon, un objet personnalisé pour un patient. Cela peut être pour des aides auditives sur mesure, des couronnes dentaires, des guides chirurgicaux, des implants osseux, des prothèses ou des orthèses.

Dans le secteur de l'agro-alimentaire, l'impression 3D par extrusion est un procédé envisagée par quelques pionniers pour l'extrusion de pâtes alimentaires. C'est aussi un procédé de fabrication envisagé pour la mise en forme d'aliments à base de protéines végétales comme substitut aux protéines animales.

En offrant la possibilité de créer des micro-entités de production, la fabrication additive s'inscrit pleinement dans ce que l'on nomme l'industrie du futur, en proposant une réponse concrète au problème de la désindustrialisation. Ces micro-centres de fabrication, en alliant production et service, permettent des fabrication à la demande, voire personnalisée, tout en optimisant les ressources (énergie et matière) utilisées.



## 5. L'impression 3D des médicaments

### Une révolution industrielle ?

L'impression 3D est un terme générique qui regroupe différentes technologies permettant la production d'objets tridimensionnels à partir d'une fabrication additive de matériaux selon un modèle numérique 3D. Les applications de l'impression 3D sont multiples. D'abord cantonnée au prototypage afin de permettre une diminution des durées de développement, elles concernent aujourd'hui l'ensemble des secteurs industriels.

Dans le domaine des médicaments, cette technique offre de nombreuses possibilités, avec notamment un accroissement de la complexité et une personnalisation des produits. Elle pourrait ainsi apporter de nombreux avantages comme une diminution des effets secondaires, une amélioration de l'efficacité, le développement de nouvelles thérapies, une meilleure acceptation par les patients, notamment les enfants ou les personnes âgées.

L'impression 3D devrait également impacter l'ensemble de la chaîne de production en permettant la production à tout moment et en tout lieu, dans une perspective d'industrie du futur. La crise du Covid-19 a ainsi montré le potentiel de l'impression 3D dans ce contexte. En effet, de nombreuses initiatives locales à travers le monde ont permis d'apporter des solutions aux pénuries de matériel, notamment en milieu médical (écran de protection, respirateurs artificiels, ...) dès les premiers instants de la crise, en attendant que des solutions à plus grande échelle aient le temps de prendre le relais.

Il semble donc évident que l'impression 3D jouera un rôle majeur dans le domaine du médicament dans un futur proche et elle est de toute façon déjà une réalité aujourd'hui avec l'autorisation en 2015 par la FDA du premier médicament imprimé en 3D, le Spritam®, destiné à traiter l'épilepsie. Il reste cependant encore de nombreux obstacles à surmonter, tant technologiques que sociétaux, avec par exemple la gestion de la chaîne d'approvisionnement ou l'acceptabilité sociale.



# Glossaire

## ASTM F42

Le Comité ASTM F42 sur les technologies de fabrication additive a été formé en 2009. Le F42 se réunit deux fois par an, généralement au printemps et à l'automne (respectivement aux États-Unis et hors des États-Unis), avec environ 150 membres participant à deux jours de réunions techniques. Le Comité, qui compte actuellement plus de 725 membres, compte 8 sous-comités techniques ; toutes les normes développées par F42 sont publiées dans le livre annuel des normes ASTM, volume 10.04. Ces normes joueront un rôle prééminent dans tous les aspects des technologies de fabrication additive.

## CAO

Conception assistée par ordinateur : outils informatiques permettant la réalisation d'une modélisation géométrique d'un objet, en vue de sa fabrication matérielle.

## FDM

*Fused deposition modeling* (en français, dépôt de fil fondu), une technologie d'impression 3D par dépôt de fil.

## FFF

Le dépôt de fil fondu (**DFD**) ou *Fused deposition modeling* (**FDM**) ou encore *Fused Filament Fabrication* (**FFF**) est une technologie d'impression 3D.

## GCode

GCode est un format de fichier correspondant au langage G-Code. Ce langage est utilisé par les machines à commande numérique pour décrire les mouvements de l'outil. Par extension, ce langage est utilisé par la plupart des imprimantes 3D.

## GNU

La licence publique générale **GNU**, ou **GNU General Public License** (son seul nom officiel en anglais, communément abrégé **GNU GPL**, voire simplement « **GPL** »), est une licence qui fixe les conditions légales de distribution d'un logiciel libre du projet **GNU**.

Le projet **GNU** est un projet informatique dont les premiers développements ont été réalisés en janvier 1984 par Richard Stallman, pour développer le système d'exploitation **GNU**. Richard Stallman est aussi président et fondateur de la *Free Software Foundation*.

## OBJ

Le format de fichier OBJ est un format de stockage des informations nécessaires à la définition d'un modèle 3D d'un objet. Ce format permet de décrire la géométrie de surface d'un objet par de multiples surfaces polygonales, et comporte des informations de texture, de couleur et de matériau.

## PBF

Le procédé **PBF** (pour *Powder Bed Fusion*) ou SLS, est un procédé de fabrication additive par fusion sur lit de poudre. Pour chaque couche, un faisceau d'énergie (par exemple un laser) effectue un balayage sur la surface du lit de poudre et chauffe localement la surface de poudre et l'agglomère aux couches précédentes par frittage. Une nouvelle couche de poudre est ensuite étalée et le processus recommence.

## RepRAP

**RepRap** (contraction de l'anglais *Replication Rapid prototyper*, pouvant se traduire par concepteur de réplique rapide) est un projet britannique de l'université de Bath, visant à créer une imprimante tridimensionnelle en grande partie autorépliquable et libre (c'est-à-dire sans brevet, et dont les plans sont disponibles pour tout le monde) sous licence **Licence publique générale GNU**.

**RepRap** désigne également les imprimantes 3D réalisées par le projet **RepRap**. Ce projet/machines réelles est maintenant développé très activement par une communauté mondiale, à la manière du logiciel libre.

## SLA

SLA (Stéréolithographie Apparatus) Cette technique utilise en général une résine spéciale sensible au traitement par rayon laser. À l'ajout de chaque couche de résine, le laser apporte l'énergie pour chauffer la résine qui durcit, jusqu'à former l'objet complet.

## SLS

Le procédé **SLS** (pour *Selective Laser Sintering*) ou PBF, est un procédé de fabrication additive par fusion sur lit de poudre. Pour chaque couche, un faisceau d'énergie (par exemple un laser) effectue un balayage sur la surface du lit de poudre et chauffe localement la surface de poudre et l'agglomère aux couches précédentes par frittage. Une nouvelle couche de poudre est ensuite étalée et le processus recommence.

## STL

Le format de fichier STL est un format de stockage des informations nécessaires à la définition d'un modèle 3D d'un objet. Ce format est très utilisé pour les imprimantes 3D, car il permet de décrire la géométrie de surface d'un objet (par tessellation), sans texture, couleur ou information spécifique au matériau.

## Webographie

[**GCode Viewer**] *GCode Viewer*, Outil gratuit en ligne, pour la visualisation et l'analyse d'un fichier GCode, <http://gcode.ws/>

[**OpenSCAD**] *OpenSCAD*, logiciel open-source et multi-plateforme permettant la conception d'objet 3D par une approche de programmation, <https://www.openscad.org/>

[**PrusaSlicer**] *PrusaSlicer* est un logiciel de tranchage qui permet de définir les couches qui vont être imprimées par une imprimante 3D, <https://www.prusa3d.fr/prusaslicer/>

[**Slic3r**] *Slic3r*, logiciel open-source et multi-plateforme pour l'impression 3D, visualisation de STL et génération de G-Code, <https://slic3r.org/>



## Crédits des ressources

**Exemple de la conception d'un objet 3D avec OpenSCAD** p. 12

*Attribution - Partage dans les Mêmes Conditions - Fabien Baillon*

**fichier STL d'un objet 3D** p. 12

*Attribution - Partage dans les Mêmes Conditions - Fabien Baillon*

**Vidéo du tranchage d'un objet 3D** p. 13

*Attribution - Partage dans les Mêmes Conditions - Fabien Baillon*

**Capture du tranchage d'un objet 3D** p. 13

*Attribution - Partage dans les Mêmes Conditions - Fabien Baillon*

**Vidéo de prévisualisation du déplacement de la tête d'impression 3D, selon le fichier de commande gCode** p. 14

*Attribution - Partage dans les Mêmes Conditions - Fabien Baillon*

**Prévisualisation du déplacement de la tête d'impression 3D, selon le fichier de commande gCode** p. 14

*Attribution - Partage dans les Mêmes Conditions - Fabien Baillon*