

LA FABRICATION ADDITIVE

Définition générale (source wikipédia)

L'**impression 3D** ou **fabrication additive** regroupe les [procédés de fabrication](#) permettant de créer des pièces en volume par ajout de matière en couches successives. Elle s'oppose à la [fabrication soustractive](#). Cette famille de procédés a commencé à se développer au début des années 1980 avec pour objectif principal de faciliter le prototypage rapide, puisque le [coût de production](#) est pratiquement indépendant de la quantité produite.

Les applications de l'impression 3D sont multiples. D'abord cantonnée au [prototypage](#) et aux visualisations pour l'architecture ou les études de [design](#), elle se développe ensuite dans le domaine de l'appareillage et la prothèse. Les évolutions technologiques successives en ont fait une technologie plus mature qui est aujourd'hui utilisée dans des domaines aussi variés que l'[industrie](#), l'[aéronautique](#), la [construction](#), l'[armée](#), la [bio-impression](#) ou l'[alimentation](#).

Initialement réservée aux industriels du fait de son coût et sa difficulté de mise en place, l'impression 3D a connu une révolution dans les [années 2000](#) à la suite des développements amorcés par le projet [RepRap](#) et l'expiration du brevet sur la technologie FDM ([Fused Deposition Modelling](#)).

Aujourd'hui l'impression de nombreux matériaux est possible, selon le procédé utilisé. On peut notamment relever le [plastique](#) (généralement [PLA](#) ou [ABS](#)), la [cire](#), le [métal](#) ([aluminium](#), [acier](#), [titane](#), [platine](#)), le [plâtre de Paris](#), les céramiques et même le verre.

Malgré les avancées majeures des années 2010, l'impression 3D domestique reste encore un hobby. S'il est désormais possible d'acquérir une imprimante 3D pour quelques centaines d'euros, celles-ci demandent encore une attention particulière et nécessitent d'être formé à son utilisation.

LA FABRICATION ADDITIVE

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 :

construction de l'objet dans un environnement de [CAO](#)

Conversion de la conception [CAO](#) au format de fichier [STL](#)

Découpage en tranches du volume [STL](#) et génération de fichier de déplacement [Gcode](#)

LA FABRICATION ADDITIVE

Processus de fabrication par impression 3D

Complément

Le format [STL](#) est le plus répandu, mais ce n'est pas le seul. On peut rencontrer aussi des fichiers de modélisation au format [OBJ](#). 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](#) qui n'utilise que des triangles).

Par ailleurs, les fichiers [OBJ](#) comportent des informations descriptives complémentaires (matériaux, textures, couleurs).

Différents logiciels de [CAO](#) existent et permettent plus ou moins facilement de concevoir des objets 3D pour la fabrication additive.

On peut citer notamment [OpenSCAD](#), qui permet de construire un objet par association de primitives, via un langage descriptif proche d'un langage de programmation.

LA FABRICATION ADDITIVE

Procédés de fabrication additive

On peut considérer 7 procédés de fabrication additive selon une classification reconnue internationalement ([ASTM F42](#)) :

- 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

LA FABRICATION ADDITIVE

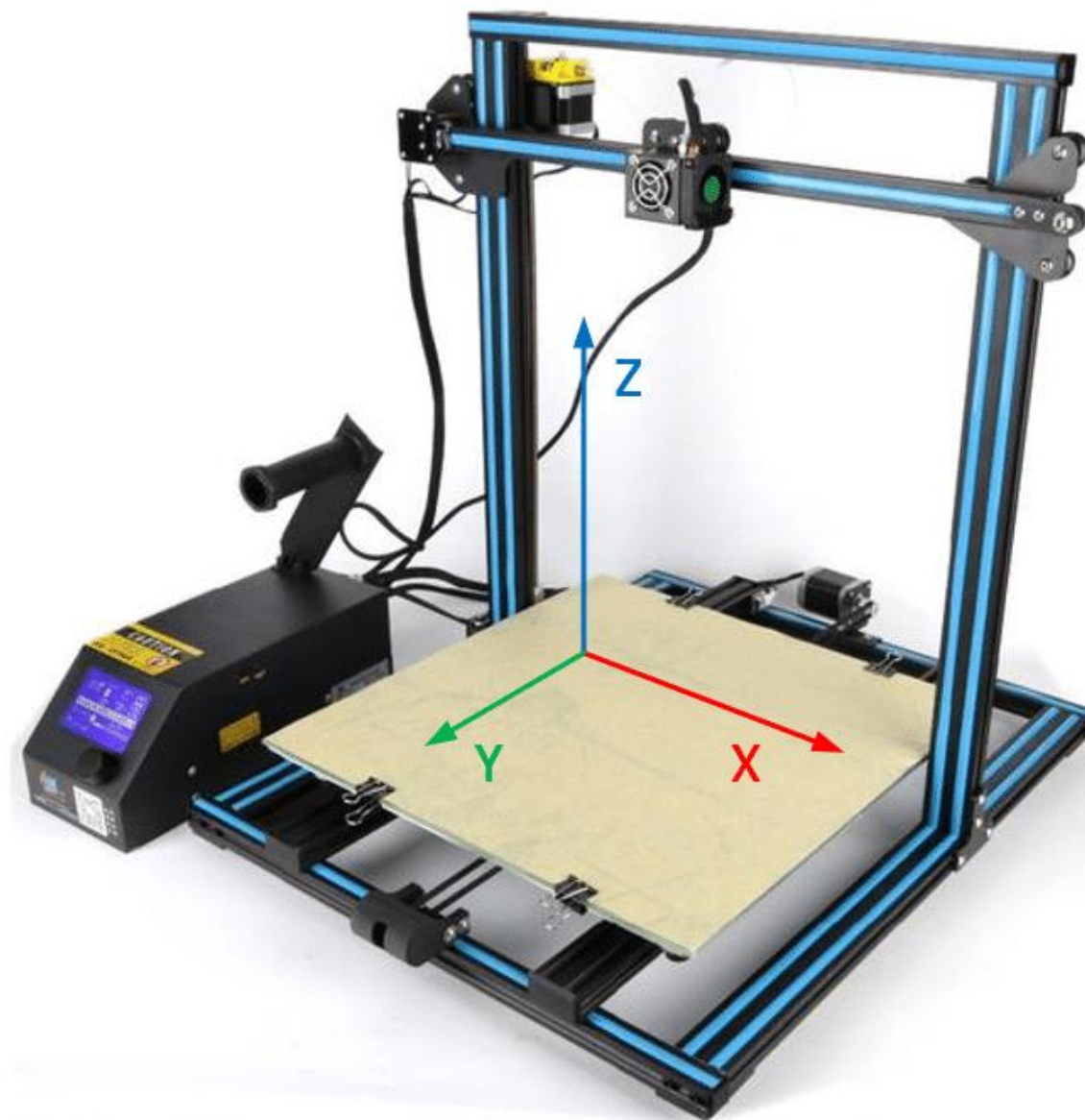
1 - Extrusion de matière

L'extrusion de matière est le procédé le plus utilisé (appelée [FDM](#), *Fused Deposition Modeling* ou [FFF](#), *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 classer 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.

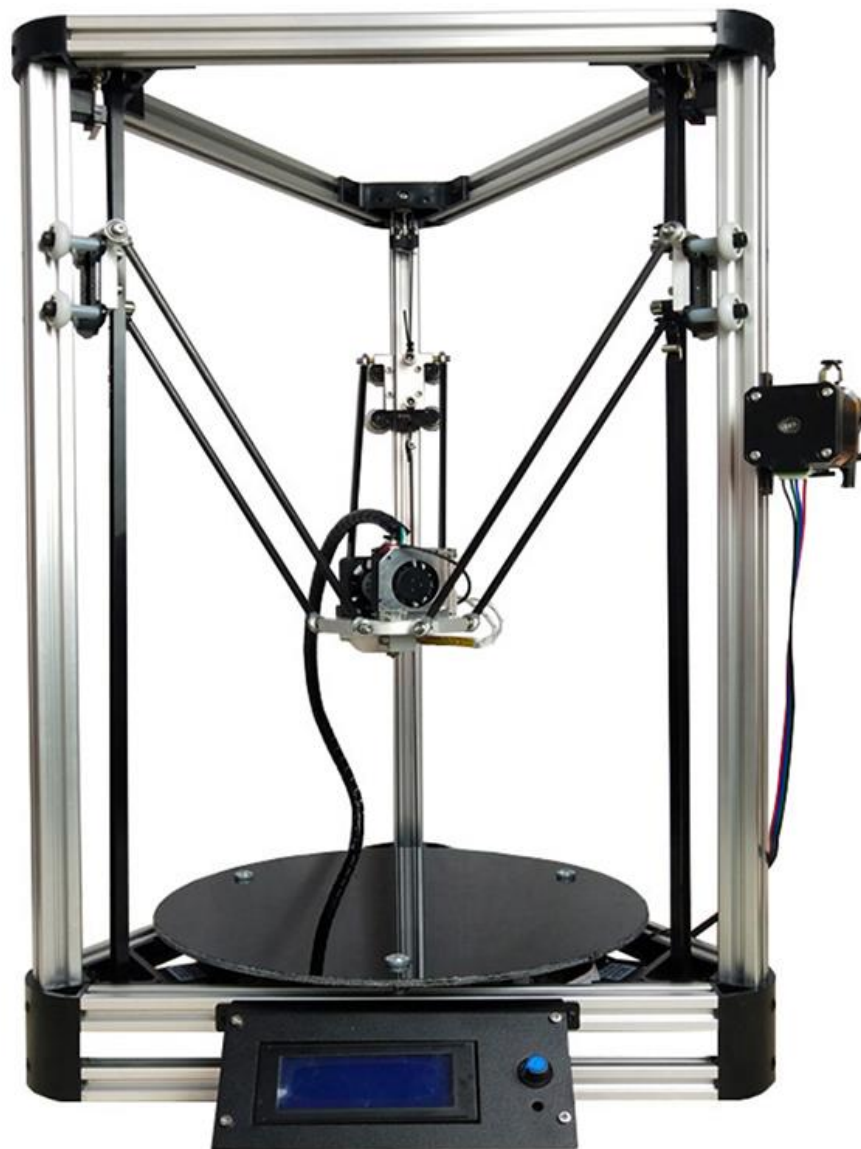
LA FABRICATION ADDITIVE

Cartésien :



LA FABRICATION ADDITIVE

Delta :



LA FABRICATION ADDITIVE

Polaire :



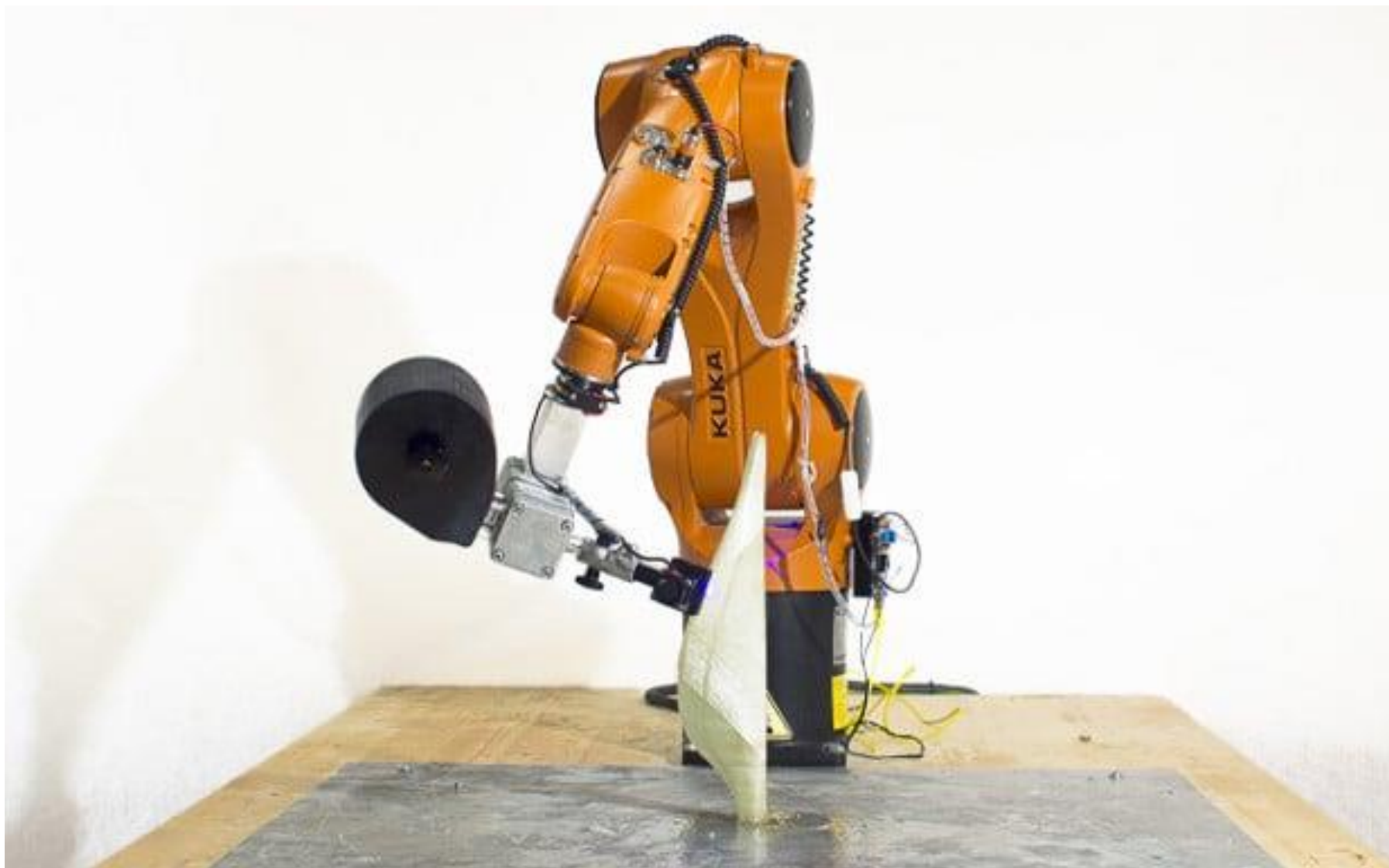
LA FABRICATION ADDITIVE

Polaire :



LA FABRICATION ADDITIVE

A bras robotique :



LA FABRICATION ADDITIVE

A bras robotique :



LA FABRICATION ADDITIVE

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 adapté 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.

LA FABRICATION ADDITIVE

2 - Photo-polymérisation

Le procédé d'impression 3D par photo-polymérisation (stéréolithographie ou [SLA](#) 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 par 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).

<https://www.youtube.com/watch?v=uKRowGRL0vg>

LA FABRICATION ADDITIVE

3 - Procédé par fusion de poudre

L'impression 3D par fusion de poudre ([PBF](#), *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](#) (*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.

<https://www.youtube.com/watch?v=p0Jpw5UxhtQ>

<https://www.youtube.com/watch?v=7B2jXgP02hc>

LA FABRICATION ADDITIVE

4 - 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 matérielle, 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.

<https://youtu.be/Som3CddHfZE>

LA FABRICATION ADDITIVE

5 - 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.

<https://www.youtube.com/watch?v=M0rb4i6f7TA>

LA FABRICATION ADDITIVE

6 - 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.

<https://youtu.be/GVzRyKxD6Zc>

7 - 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.

<https://youtu.be/oL7bMhPTtDI>

LA FABRICATION ADDITIVE

Processus de fabrication par impression 3D

Méthode

Les étapes incontournables sont :

- construction de l'objet dans un environnement de [CAO](#)
- Conversion de la conception [CAO](#) au format de fichier [STL](#)
- Découpage en tranches du volume [STL](#) et génération de fichier de déplacement [GCode](#)

LA FABRICATION ADDITIVE

Complément

Le format [STL](#) est le plus répandu, mais ce n'est pas le seul. On peut rencontrer aussi des fichiers de modélisation au format [OBJ](#). 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](#) qui n'utilise que des triangles). Par ailleurs, les fichiers [OBJ](#) comportent des informations descriptives complémentaires (matériaux, textures, couleurs).

Différents logiciels de [CAO](#) existent et permettent plus ou moins facilement de concevoir des objets 3D pour la fabrication additive.

On peut citer notamment [OpenSCAD](#), qui permet de construire un objet par association de primitives, via un langage descriptif proche d'un langage de programmation.

LA FABRICATION ADDITIVE

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

Quelques repères chronologiques :

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

Le premier brevet pour la [FDM](#) 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](#) permettra la naissance de projet de recherche [RepRAP](#) (*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](#), *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.

LA FABRICATION ADDITIVE

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^{ème} 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).

LA FABRICATION ADDITIVE

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 futur 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

LA FABRICATION ADDITIVE

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.

LA FABRICATION ADDITIVE

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 de 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.

LA FABRICATION ADDITIVE

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.

LA FABRICATION ADDITIVE

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 envisagé 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 fabrications à la demande, voire personnalisée, tout en optimisant les ressources (énergie et matière) utilisées.

LA FABRICATION ADDITIVE

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.

LA FABRICATION ADDITIVE

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.

<https://youtu.be/krukI6Pn9Ik>

LA FABRICATION ADDITIVE

L'impression 3D des bâtiments



<https://www.youtube.com/watch?v=dJIzlgT0e8E>

LA FABRICATION ADDITIVE

Les matériaux utilisés

Les matériaux plastiques



Parmi les thermoplastiques les plus employés en FDM (dépôt de matière fondue), on retrouve 2 consommables dominants : le PLA et l'ABS, des polymères qui deviennent mous et malléables lorsqu'ils sont chauffés et qui reviennent à un état solide au moment de refroidir.

LA FABRICATION ADDITIVE

PLA ou acide Polyactique

Le PLA est le consommable le plus couramment utilisé en impression 3D FDM à dépôt de fil. Ecologique car d'origine végétale (amidon de maïs, racine de manioc et betterave) ce plastique biodégradable et non toxique, dégage il une légère odeur sucrée pendant son impression. Si le PLA est pur et que l'extrudeur de l'appareil est en acier inoxydable, alors celui-ci peut être utilisé pour imprimer des objets destinés à être en contact avec des aliments tels que des bols ou des tasses par exemple.

Une bobine de 1kg [de PLA](#) de 1,75 mm mesure en moyenne 330 mètres et 115 mètres en 3mm.

Température d'impression : entre 190 et 210 °C / Plateau chauffant optionnel

Densité : 1,25g/cm³

Points forts : Ne dégage pas de mauvaise odeur et facile à imprimer

Points faibles : Sensible à l'humidité et à la chaleur

LA FABRICATION ADDITIVE

ABS ou Acrylonitrile Butadiène Styrène

Fabriqué à base de pétrole il s'agit du matériau le plus polyvalent car compatible avec presque toutes les imprimantes 3D, y compris les dérivés de RepRap et ceux de MakerBot, Ultimaker, Bits de Bytes, Airwolf3D... L'ABS qui est soluble dans l'acétone permet de souder les pièces métalliques avec une goutte ou deux, ou de lisser et créer un effet brillant par brossage ou trempage pièces entières dans l'acétone. Sa force, sa souplesse et sa meilleure résistance à la température font de lui le matériau préféré pour les ingénieurs, et les applications professionnelles.

Une bobine de 1kg d'[ABS](#) de 1,75 mm mesure en moyenne 410 mètres et 140 mètres en 3 mm.

Température d'impression : entre 220 et 260 °C / Plateau chauffant entre 60 et 110°C

Densité : 1,01g/cm³

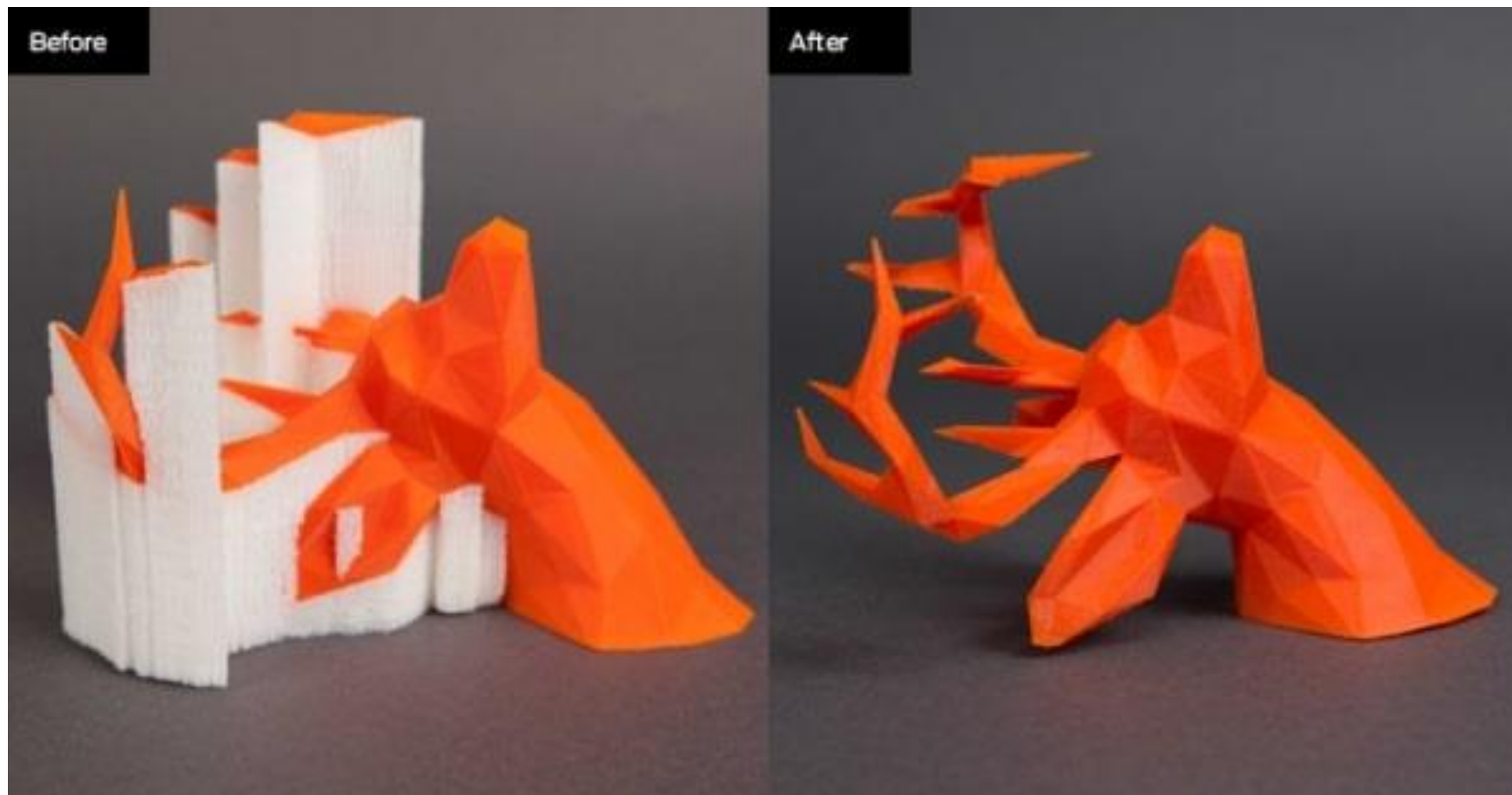
Points forts : Matériau polyvalent et particulièrement résistant, supporte bien les écarts de température.

Points faibles : Odeurs pendant l'impression et parfois sujet au phénomène dit de [warping](#) (décollement des bords de la pièce et déformation).

Pour ces deux consommables, il faut compter en moyenne [20€](#) la bobine de 1kg. Le prix varie beaucoup en fonction de la couleur, du type de filament et de la marque, s'il s'agit ou non d'un filament propriétaire, certaines imprimantes fonctionnant avec leurs propres matériaux.

LA FABRICATION ADDITIVE

PVA et HIPS : les matériaux de support solubles



LA FABRICATION ADDITIVE

Pour une impression 3D de type FDM (dépôt de matière fondue), il faudra prévoir ce que l'on appelle un raft (ou ratier). Il s'agit d'un support qui permet de soutenir la pièce sur le plateau pendant l'impression pour qu'elle reste stable. Celui-ci se présente sous la forme d'une grille qui permet une meilleure accroche. Il existe aussi des structures de soutien (voir photo ci-dessous), des [sortes d'échafaudage](#) qui permettent de soutenir les parties en surplomb comme le bras d'une figurine par exemple.

Les matériaux les plus utilisés sont le PVA et l'HIPS (high-impact polystyrene) qui tous deux peuvent se dissoudre dans de l'eau ou avec du D-Limonene (un solvant) en l'espace de 24h. Ce dernier s'utilise avec de l'ABS qui possède les mêmes températures d'extrusion et de plateau, de ce fait ce matériau ne concerne que les imprimantes 3D à double extrudeur.

Température d'impression du PVA : entre 190 et 210 ° C / plateau chauffant optionnel

Points forts : facile à imprimer et inodore

Points faible : sensible à l'humidité

Température d'impression de l'HIPS : entre 220 et 260 °C / plateau chauffant entre 60 et 110 °C

Points forts : Bonne finition et généralement moins cher que le PVA

Points faibles : Parfois sujet au warping

Environ [30 €](#) la bobine de 500 g pour le PVA et [25 €](#) pour le HIPS

LA FABRICATION ADDITIVE

La poudre de polyamide



LA FABRICATION ADDITIVE

Ce matériau est notamment utilisé pour imprimer des prototypes en plastique blanc, selon un procédé d'impression 3D par frittage laser. Cette technique repose sur l'utilisation d'un faisceau laser qui vient sculpter votre objet en fusionnant les grains qui se solidifient sous l'effet de la chaleur.

Le polissage permet de finir la pièce. Cette poudre offre un grand niveau de détail et donne aux impressions un aspect sableux, granuleux et légèrement poreux. Par conséquent un polissage est souvent nécessaire. Les pièces peuvent être ensuite colorées en les plongeant dans un [bain de teinture](#) adapté. Surtout utilisée pour la fabrication de mécanismes et d'engrenages, elle est également compatible pour des objets à contacts alimentaires.

Entre 50 et 100 € le kg

LA FABRICATION ADDITIVE

La poudre d'alumide



L'alumide est un mélange de polyamide et d'aluminium. Ce matériau offre l'avantage de pouvoir réaliser des pièces à la fois très solides et très flexibles avec une importante résistance à la chaleur. D'un aspect proche du métal, son impression se fait par [frittage laser](#) avec des particules d'alumine de $60\ \mu\text{m}$ (micromètres). Les objets imprimés avec nécessitent ensuite divers finitions telles que le polissage ou le meulage.

LA FABRICATION ADDITIVE

La résine liquide



LA FABRICATION ADDITIVE

Diverses technologies d'impression 3D par « stéréolithographie », telles que SLA, DLP ou PolyJet, utilisent des résines [liquides photosensibles](#). On appelle ainsi les imprimantes 3D qui utilisent une source de lumière telle qu'un laser, un projecteur ou une lumière UV pour transformer divers matériaux liquides en plastique solide.

Les pièces imprimées selon ce procédé se caractérisent par des objets très détaillés avec une surface lisse. Bien qu'offrant une palette de couleurs plus restreinte que d'autres procédés tels, l'impression 3D résine dépasse désormais les simples teintes de base telles que le noir, le blanc, le gris et le transparent. On trouve désormais un plus large éventail de couleurs telles que le rouge, bleu, jaune et le vert. En revanche, il convient de souligner que les capacités offertes par les technologies industrielles reposant sur des procédés à jets de matière ou de liant diffèrent grandement. La technologie Polyjet de Stratasys, par exemple, est capable de combiner des [millions couleurs, qui plus est photoréalistes](#)

LA FABRICATION ADDITIVE

Des résines plus avancées existent pour des applications techniques spécifiques, comme la dentisterie (où la biocompatibilité est primordiale) ou l'ingénierie. On observe également certaines avancées avec l'apparition de [résines à haute viscosité](#) visant à répondre aux besoins des industriels pour des pièces plus techniques.

Côté finition, enfin, précisions enfin que l'utilisation de résines en impression 3D nécessite le plus souvent un processus de post-traitement, où les pièces doivent être nettoyées à l'alcool isopropylique, puis durcies pour des résultats optimaux.

Le prix de ces résines est très variable : entre 100 € et 600 € le litre. (pour l'imprimante Form2 de Formlabs par exemple comptez environ 110€ la recharge de 1L.)

LA FABRICATION ADDITIVE

Les cires



LA FABRICATION ADDITIVE

La cire est composée de polymère et fond comme les autres plastiques. Ce matériau est principalement utilisé en bijouterie et en dentisterie pour la création de moules où son ensuite coulés d'autres matériaux comme du métal ou de la céramique.

Ce consommable à l'avantage de produire des pièces plus précises qu'avec les méthodes traditionnelles, mais aussi une meilleure qualité de surface que le FDM. Il confère en effet aux pièces un aspect lisse sans porosité en limitant les craquelures et permet de reproduire des produits fins à l'image des alvéoles d'un nid d'abeilles. Le rendu est quasi-parfait. La solidité et sa souplesse sont ses points faibles.

L'une des cires les plus connues du marché est la gamme [Visijet](#) de 3D Systems. De couleur verte, grise, ou bleue, cette résine calcinable permet de fabriquer des moules pour la fonderie. Citons également la Dentcast qui se destine aux moules dentaires.

LA FABRICATION ADDITIVE

Les poudres métalliques



LA FABRICATION ADDITIVE

Après les plastiques, les métaux sont les matériaux les plus employés en impression 3D et essentiellement par les industriels. En tête des utilisations on retrouve le titane et l'acier inoxydable (inox), viennent ensuite l'aluminium, le cobalt, le fer et les métaux précieux tels l'or et le platine. La fabrication additive a cette capacité à pouvoir produire des pièces métalliques aux géométries plus complexes qu'avec les techniques de fabrication soustractives telles que le fraisage ou par moulage.

Le plus souvent les objets en métal sont imprimés à partir de poudres métalliques fusionnées avec un laser (procédé DMLS). En combinant l'impression 3D à l'optimisation topologique, on obtient des pièces beaucoup plus légères que des pièces traditionnelles et même plus résistantes, grâce à des géométries optimisées et l'absence de fixations. Cette capacité intéresse particulièrement les constructeurs [aéronautiques et spatial](#), et de l'automobile, dans un souci de performance et d'économie de carburant.

LA FABRICATION ADDITIVE

L'acier inoxydable



LA FABRICATION ADDITIVE

Plus connu sous l'appellation « d'inox », l'acier inoxydable a été le premier métal à être commercialisé pour la fabrication additive. Comme son nom le suggère il possède des propriétés mécaniques de haute résistance à la corrosion.

Parmi les plus connus on peut citer le M1, le PH1 ou le StainlessSteel GP1 du constructeur EOS, une poudre fine d'acier inoxydable réputée pour sa grande résistance à la corrosion et son excellente ductilité (capacité à se déformer sans rompre) sans aucun traitement ultérieur.

Entre 90 et 200 € le kg.

LA FABRICATION ADDITIVE

L'acier d'outillage maraging

L'acier d'outillage maraging est un acier inoxydable [martensitique](#). Sous groupe des aciers inoxydables, il se caractérise par une grande solidité et dureté, obtenues après un traitement ultérieur thermique. Cet acier se destine avant tout à la fabrication d'outillage rapide (découpage, extrusion...) et de moules dans les domaines de l'aéronautique, l'astronautique et l'automobile.

Là encore on peut citer le fabricant EOS et son acier martensitique MS1, capable de produire des pièces d'une résolution supérieure à celui de l'acier d'outillage SLS A6.



LA FABRICATION ADDITIVE

L'acier d'outillage maraging est un acier inoxydable [martensitique](#). Sous groupe des aciers inoxydables, il se caractérise par une grande solidité et dureté, obtenues après un traitement ultérieur thermique. Cet acier se destine avant tout à la fabrication d'outillage rapide (découpage, extrusion...) et de moules dans les domaines de l'aéronautique, l'astronautique et l'automobile.

Là encore on peut citer le fabricant EOS et son acier martensitique MS1, capable de produire des pièces d'une résolution supérieure à celui de l'acier d'outillage SLS A6.

LA FABRICATION ADDITIVE

Le titane



LA FABRICATION ADDITIVE

Les pièces imprimées à partir de titane ou de ses alliages sont réputées pour leur légèreté, leur solidité et leur résistance à la corrosion très élevée. Les techniques traditionnelles appliquées à ce matériau ont l'inconvénient d'être coûteuses et moins fiable que la fabrication additive. En effet lorsque l'on soude une pièce en titane par exemple, des impuretés ont tendance à venir s'y déposer, fragilisant ainsi celle-ci. Le titane est par ailleurs un métal qui refroidit très rapidement, il nécessite donc l'utilisation d'outils particulièrement chers.

La fabrication additive est donc de plus en plus employé lorsqu'il s'agit de travailler ce matériau, les plus gros utilisateurs étant les secteurs de l'automobile, l'aéronautique et de la médecine. Les alliages de titane tels que le Ti6Al4V sont plus solides que matériau original pur. Cet alliage biocompatible trouve notamment des applications dans la médecine. Il est utilisé par exemple pour fabriquer [d'implants en titane](#) sur mesure, sa porosité naturelle permettant aux cellules osseuses de le coloniser efficacement.

Entre 400 et 500 € le kg

LA FABRICATION ADDITIVE

L'aluminium



LA FABRICATION ADDITIVE

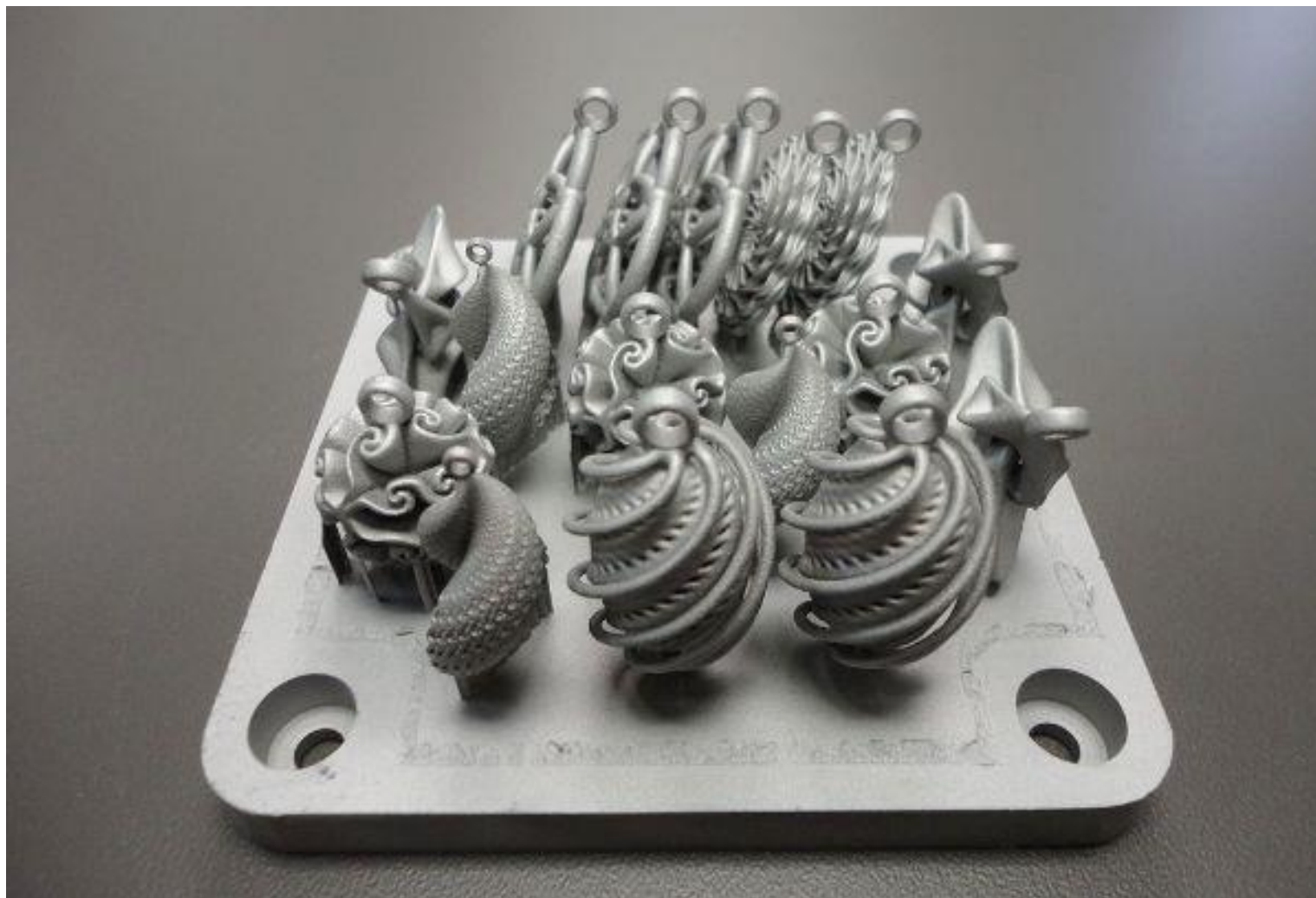
Dans cette catégorie on retrouve par exemple l'AlSi10Mg, un alliage qui par de sa composition (magnésium et silicium) est à la fois très léger et très solide. Le plus souvent, ce matériau est utilisé pour la fabrication de moules à parois fines et aux géométries complexe. Il existe aussi l'alumide, une poudre à base de polyamide et d'aluminium., qui offre l'avantage de pouvoir réaliser des pièces à la fois très solides et très flexibles avec une importante résistance à la chaleur.

D'un aspect proche du métal, son impression se fait par frittage laser avec des particules d'alumine de 60 μm (micromètres). Comme la plupart des impressions métal, les objets imprimés avec ce type de matériau nécessitent ensuite divers finitions telles que le fraisage ou le meulage.

Entre 100 et 150 € le kg

LA FABRICATION ADDITIVE

Le cobalt chrome



LA FABRICATION ADDITIVE

Grâce au procédé EBM (Electron Beam Melting), une technique voisine du SLS consistant à fusionner une poudre avec un faisceau électron, l'alliage [Cobalt Chrome](#) peut désormais être imprimé en 3D. Le suédois Arcam propose par exemple l'ASTM F75, un alliage très solide résistant à l'usure et la corrosion pour concevoir de l'outillage ou des moules.

Lisse et résistant, le CoCrMo est un autre alliage employé pour les prothèses de genou ou de hanche par exemple ou des couronnes dentaires. Toujours dans ce domaine EOS a développé Le Chrome Cobalt [EOS SP2](#) un super-alliage pulvérulent destiné aux restaurations dentaires.

Environ 250 € le kg

LA FABRICATION ADDITIVE

Les matériaux précieux



LA FABRICATION ADDITIVE

Si depuis peu, les matériaux précieux tels que [l'or](#), le platine ou le titane peuvent être directement imprimés en 3D via des poudres frittées par laser, le plus souvent ces métaux sont coulés dans des moules fabriqués par impression 3D. Ce procédé est surtout utilisé en bijouterie, où l'on pratique une technique de moulage appelée moulage à la cire perdue. Concrètement on moule l'objet en cire afin de créer un moule en plâtre dans lequel est ensuite coulé le métal fondu.

Pour l'impression 3D grand public, il existe également des filaments composites imitant l'apparence des métaux précieux. Le fabricant Hollandais ColorFabb s'en est d'ailleurs fait une spécialité en développant tout une série de filaments composites métalliques à base de PLA et de certains métaux précieux : [CopperFill](#) à base de cuivre par exemple ou [Bronzefill](#) pour des impressions en bronze.

En moyenne 50 € la bobine de 750g

LA FABRICATION ADDITIVE

La céramique

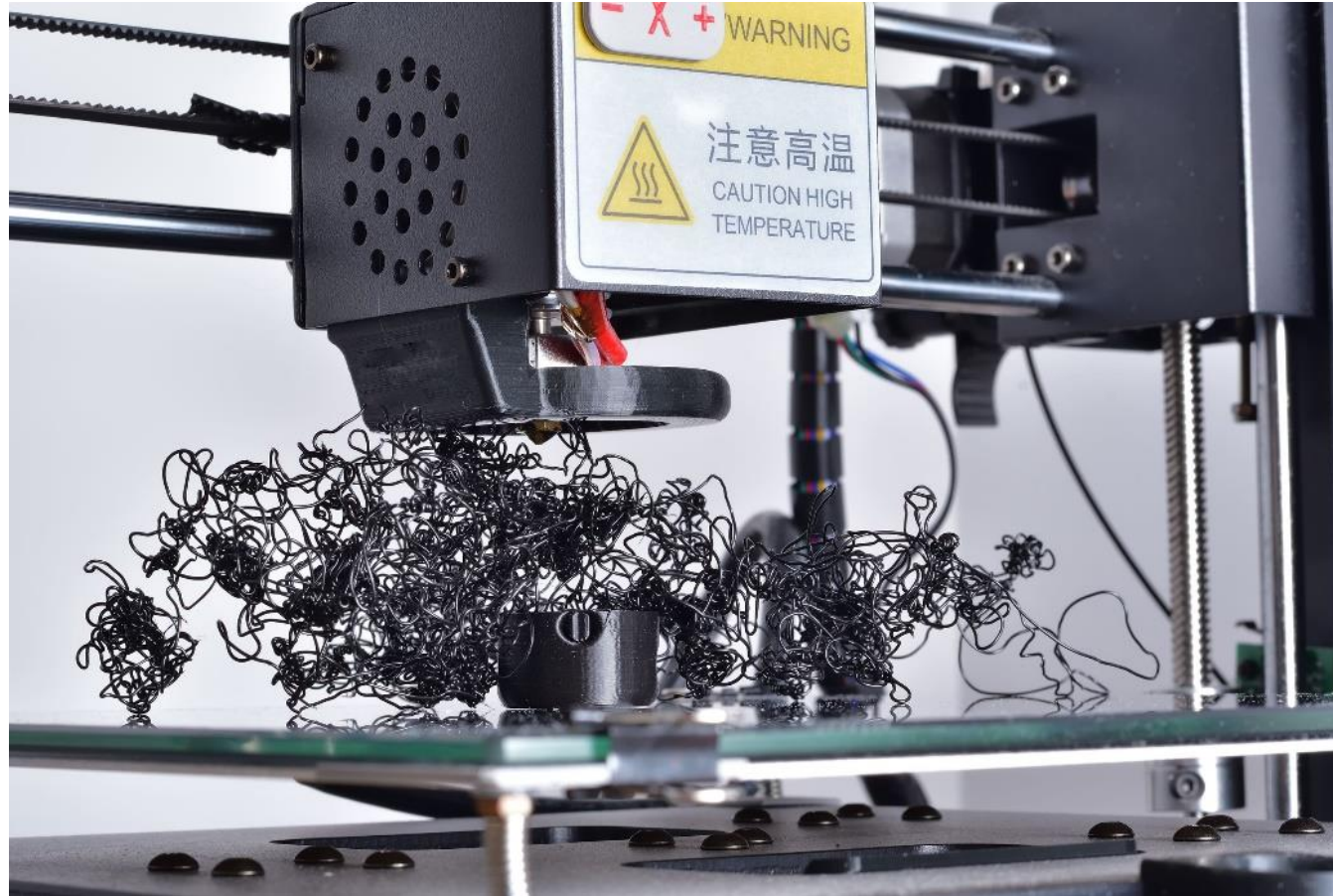


LA FABRICATION ADDITIVE

La céramique repose sur trois principaux procédés d'impression 3D : le FDM (sous la forme de [filament céramique](#) ou de pâte), le [SLA](#), et diverses techniques par pulvérisation de liant tels que la [Binder Jetting](#) (BJ). Une fois imprimé, l'objet doit subir un traitement par émaillage séché à plus de 1 000°. Ce traitement permet de durcir l'objet et de lui donner un aspect lisse et brillant. La couleur s'obtient durant la phase d'émaillage. En plus d'être étanche et recyclable, la céramique est un matériau alimentaire et biocompatible. Il est idéal pour la fabrication de vaisselles (tasses, soucoupes, assiettes...), mais aussi de d'implants médicaux et diverses composants pour l'aérospatiale.

LA FABRICATION ADDITIVE

Les défauts d'impression

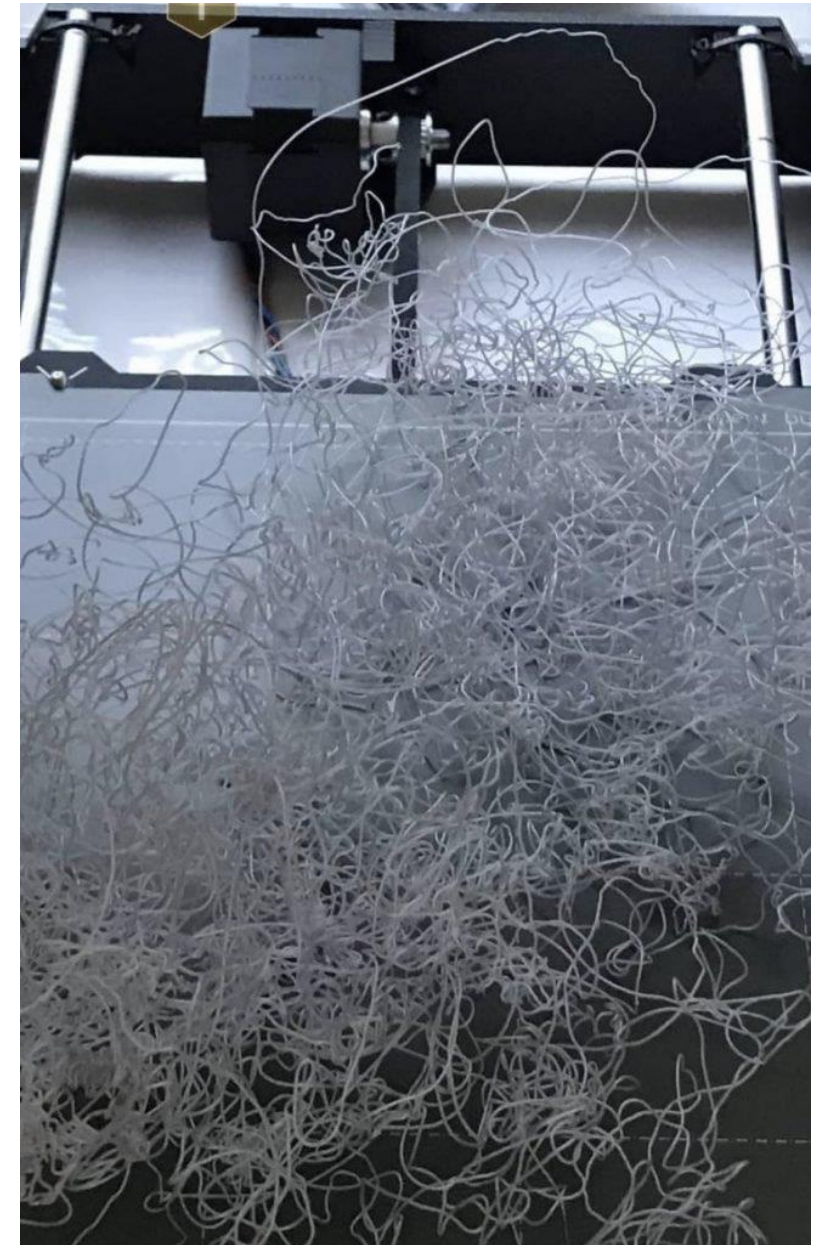


LA FABRICATION ADDITIVE

1. Problème d'adhérence du filament au plateau

L'un des problèmes les plus fréquents en impression 3D est l'adhérence insuffisante du filament au plateau. Cela se produit lorsque le filament ne colle pas correctement à la surface du plateau, ce qui peut entraîner un décalage des couches et une pièce mal formée.

Pour résoudre cette problématique, assurez-vous que le plateau soit propre et exempt de poussière ou de résidus. Utilisez également une solution adhésive spéciale telle que de la laque pour cheveux ou du ruban adhésif pour aider le filament à adhérer au plateau. Vous pouvez également ajuster la température du plateau pour obtenir une adhérence optimale lors de la première couche de votre objet.

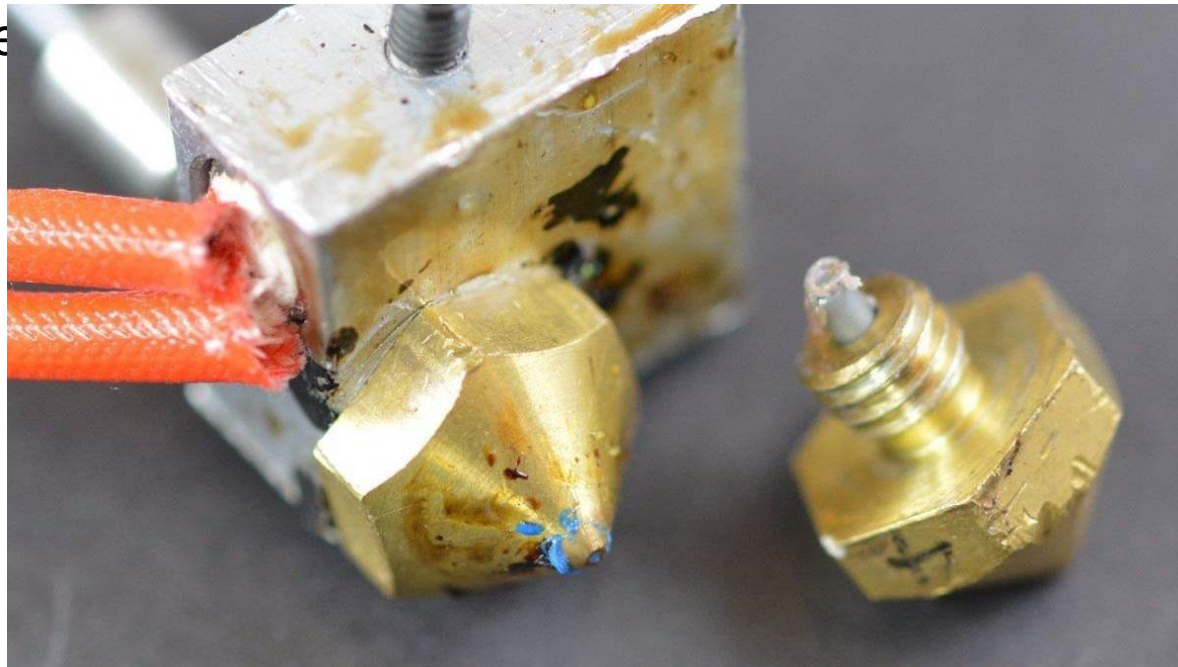


LA FABRICATION ADDITIVE

2. Problème de bouchage de la buse

Un autre souci fréquent est le bouchage de la buse d'impression. Cela se produit lorsque le filament se solidifie à l'intérieur de la buse, obstruant ainsi le passage de la matière. Cela peut avoir pour effet d'entraîner des erreurs d'impression et des défauts sur la pièce finale.

Pour résoudre ce problème, vous pouvez essayer de déboucher la buse en chauffant l'imprimante à une température élevée et en faisant passer du filament à travers la buse. Vous pouvez également nettoyer la buse à l'aide d'une fine aiguille pour éliminer tout résidu de matériau qui pourrait obstruer le passage. Cela aidera à faire passer les filaments de manière fluide à travers la buse et

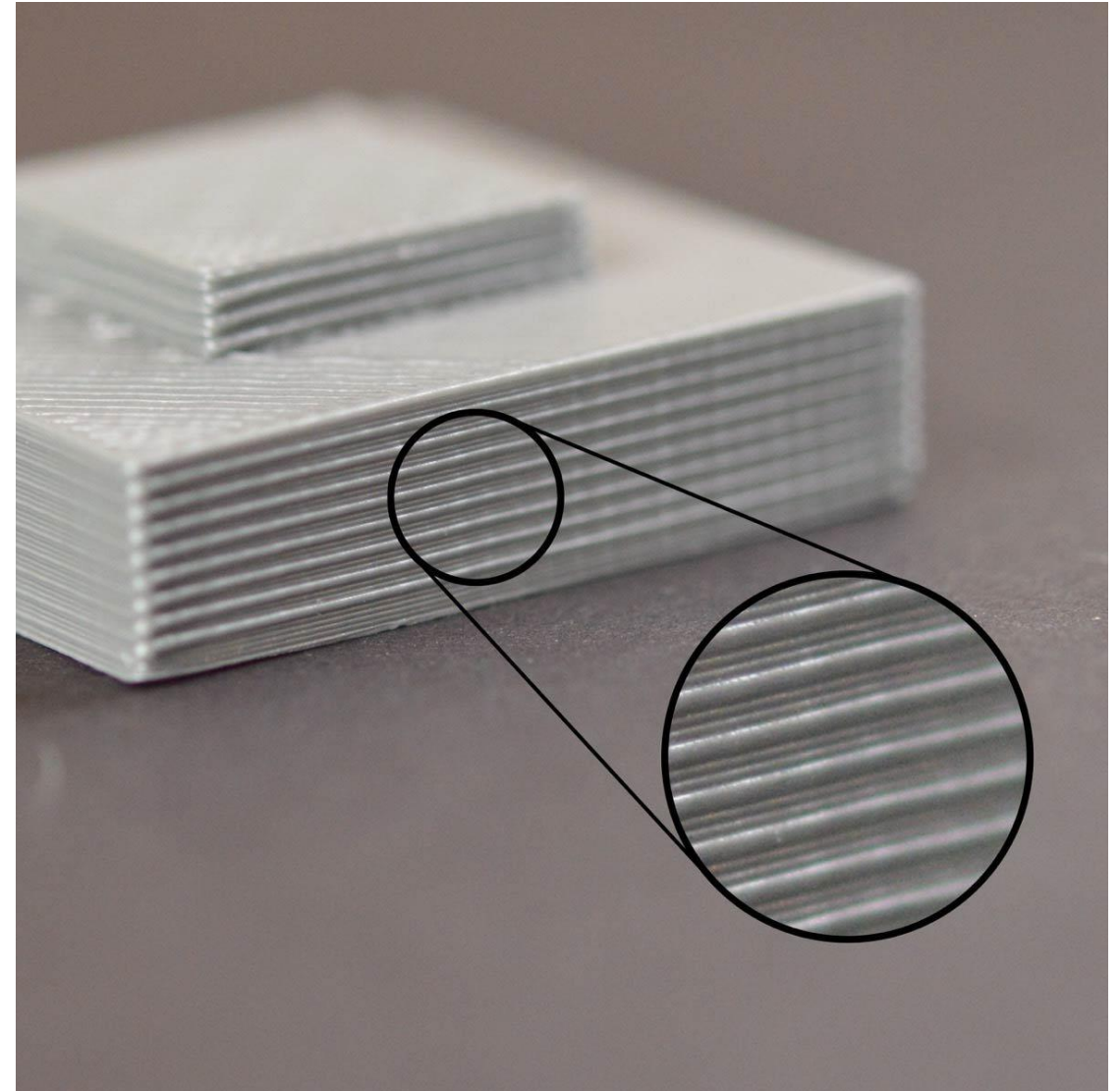


LA FABRICATION ADDITIVE

3. Problème de couches visibles sur la pièce imprimée

Lorsque les couches individuelles d'une pièce imprimée sont trop visibles, cela peut avoir pour effet de donner un aspect rugueux et peu esthétique. Cela peut être causé par une mauvaise configuration des paramètres d'impression, tels que la vitesse d'impression ou l'épaisseur des couches.

Pour corriger ce problème, vous pouvez ajuster les réglages d'impression pour réduire la vitesse d'impression ou augmenter l'épaisseur des couches. Cela permettra d'obtenir une surface plus lisse et plus uniforme sur la pièce finale. Assurez-vous également de bien régler le remplissage pour obtenir la solidité souhaitée.

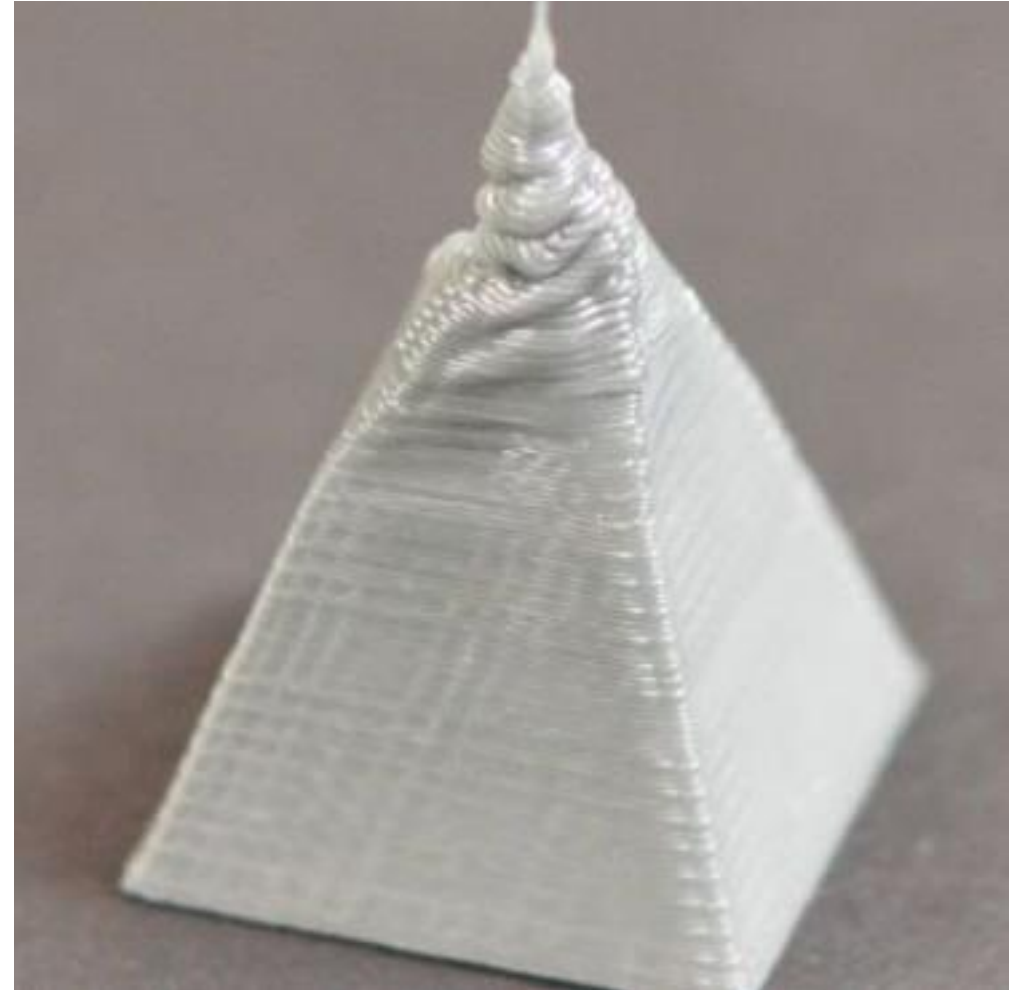


LA FABRICATION ADDITIVE

4. Problème de déformation de la pièce pendant l'impression

La déformation du modèle pendant l'impression est un problème courant, en particulier avec les matériaux tels que le plastique. Cela se produit lorsque les différentes parties de la pièce refroidissent à des vitesses différentes, ce qui entraîne des contraintes internes et une déformation.

Pour éviter la déformation, vous pouvez utiliser un plateau chauffant pour maintenir la température de la pièce constante pendant l'impression. Vous pouvez également ajouter des structures de support pour renforcer la pièce pendant l'impression. Assurez-vous également de bien calibrer votre imprimante pour obtenir une adhérence uniforme du filament sur le plateau.



LA FABRICATION ADDITIVE

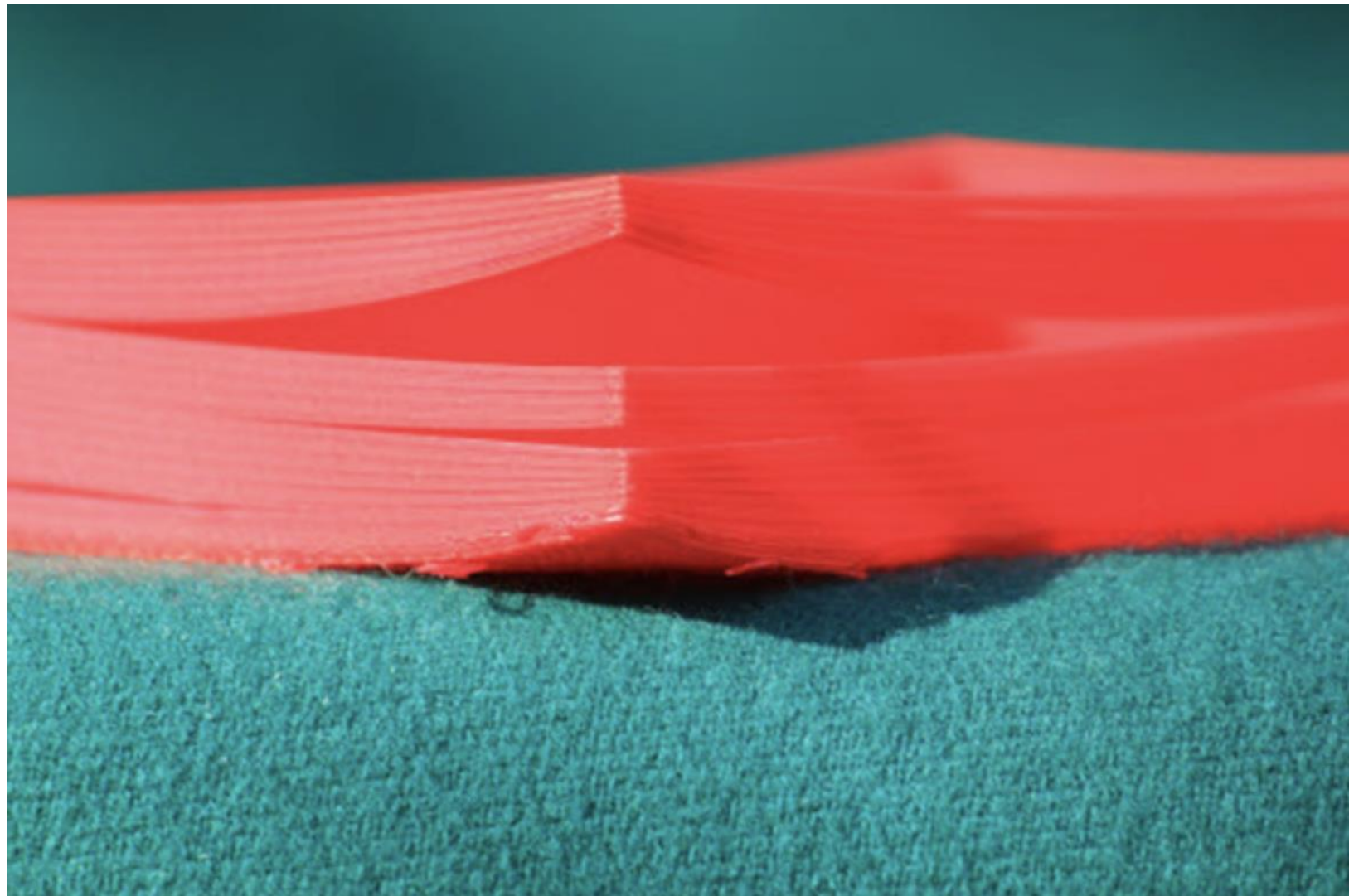
5. Problème de warping : Les angles se décollent du plateau

Le warping est un problème courant en impression 3D, où les angles de l'objet imprimé se décollent du plateau, générant une base non plane. Plusieurs facteurs peuvent contribuer à ce phénomène, tels qu'une mauvaise adhérence de la pièce au plateau, un coefficient de retrait du matériau trop élevé ou une première couche insuffisamment écrasée.

Pour résoudre cette problématique, voici quelques solutions à envisager. Tout d'abord, changer de matériau d'impression peut réduire le warping, notamment en optant pour du [PLA](#) qui présente une meilleure adhérence. Utiliser de l'adhésif sur le plateau, régler correctement la hauteur du plateau, écraser davantage la première couche et ajouter un brim en dessous peuvent également améliorer l'adhérence. Chauffer le plateau, nettoyer le support, ajuster la stratégie de remplissage en utilisant un remplissage concentrique et diminuer la densité de remplissage intérieur sont d'autres options à considérer.

En prenant en compte ces mesures correctives, vous pourrez minimiser le warping et obtenir des impressions 3D avec des bases planes et stables. Pour en apprendre plus sur [le warping](#).

LA FABRICATION ADDITIVE



LA FABRICATION ADDITIVE

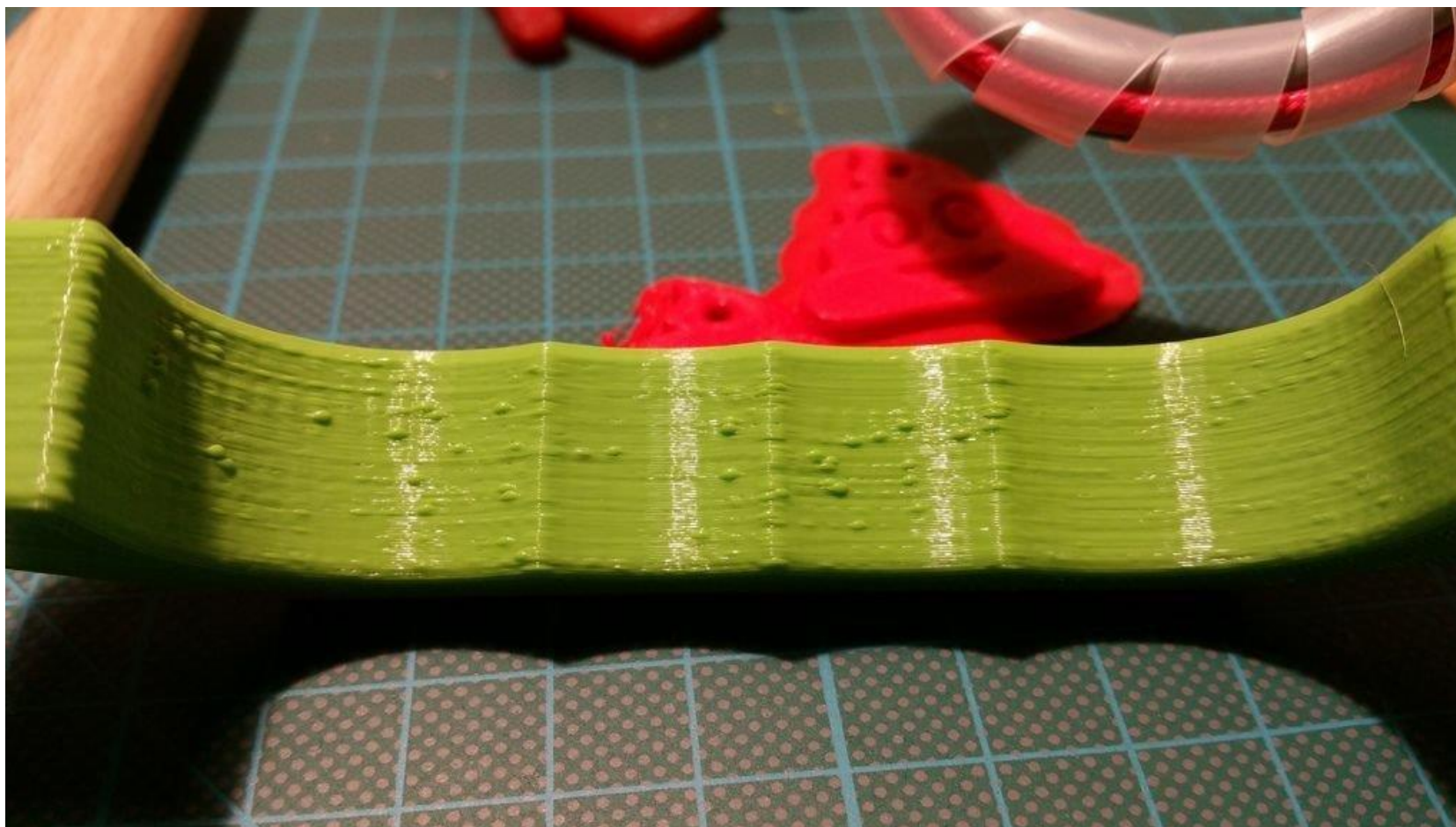
6. Problème d'apparition de gouttes en impression 3D

Lors de l'impression 3D, un souci fréquent est l'apparition de gouttelettes de matière déposées en divers points sur la surface latérale de l'objet imprimé. Ce phénomène peut compromettre la qualité et l'apparence de votre impression.

Le symptôme se caractérise par des gouttelettes de matière visibles sur la surface latérale de l'objet imprimé en 3D. Plusieurs causes peuvent expliquer ce problème. Il peut être dû à un excès d'extrusion lors de la reprise de l'impression après un arrêt, par exemple lors du passage d'un point à un autre de la pièce ou lors du changement de couche.

Pour remédier à cette difficulté, certains [logiciels de découpe \(slicer\)](#) proposent un réglage spécifique. Cette commande permet de demander, après une pause d'impression, de repousser plus de matière que ce qui a été retiré lors de la rétraction avant de redémarrer l'impression normale. En utilisant cette fonctionnalité, vous pouvez contrôler plus précisément l'extrusion du matériau, réduisant ainsi les risques d'apparition de gouttelettes.

LA FABRICATION ADDITIVE

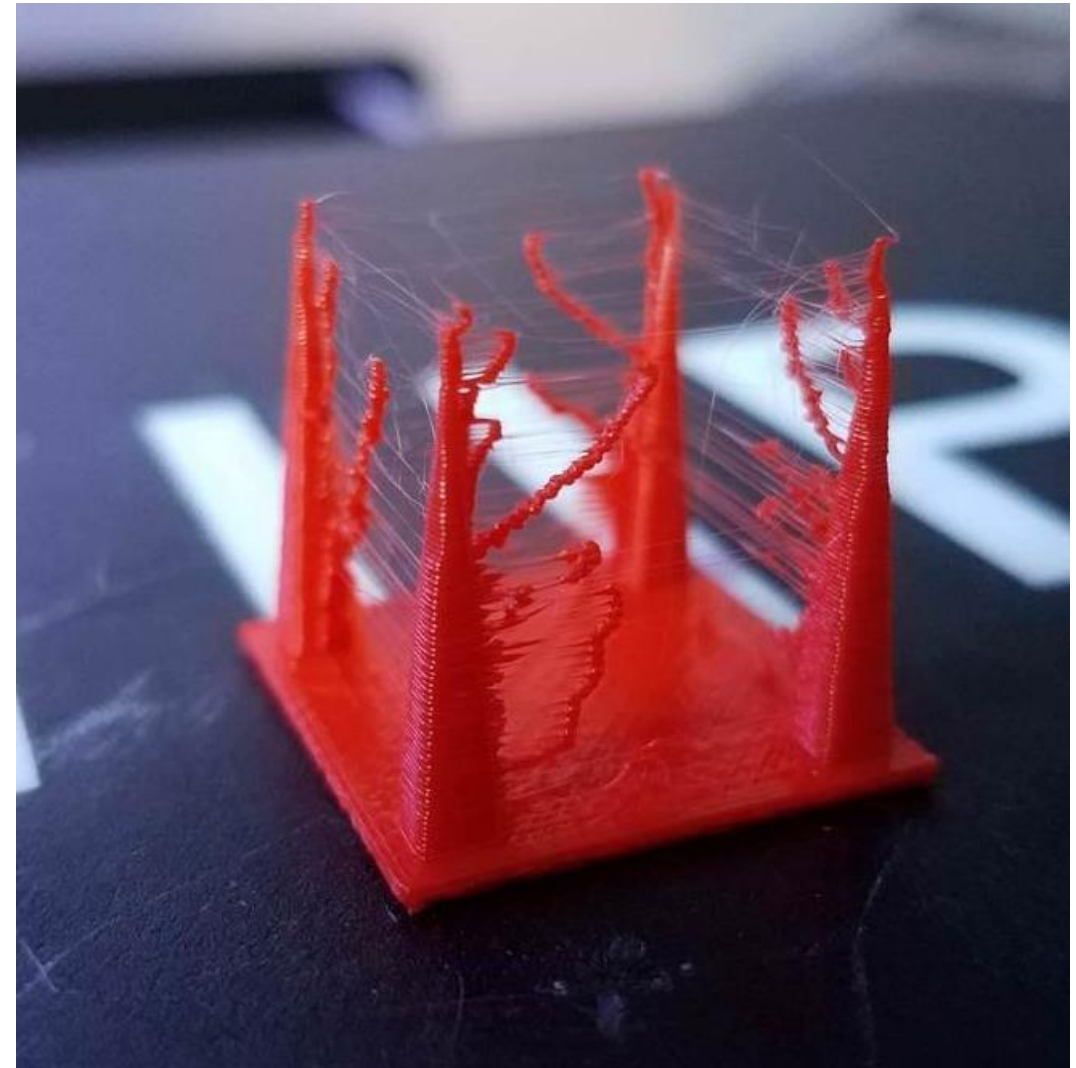


LA FABRICATION ADDITIVE

7. Problème de surchauffe du filament

La surchauffe du filament peut entraîner des problèmes tels que des bavures, des surplombs excessifs et des détails flous sur la pièce imprimée. Cela se produit lorsque la température d'extrusion est trop élevée, ce qui fait fondre le filament de manière excessive.

Pour corriger cet ennui, vous pouvez ajuster la température d'extrusion dans les paramètres d'impression. Essayez de réduire la température progressivement jusqu'à obtenir les résultats souhaités.



LA FABRICATION ADDITIVE

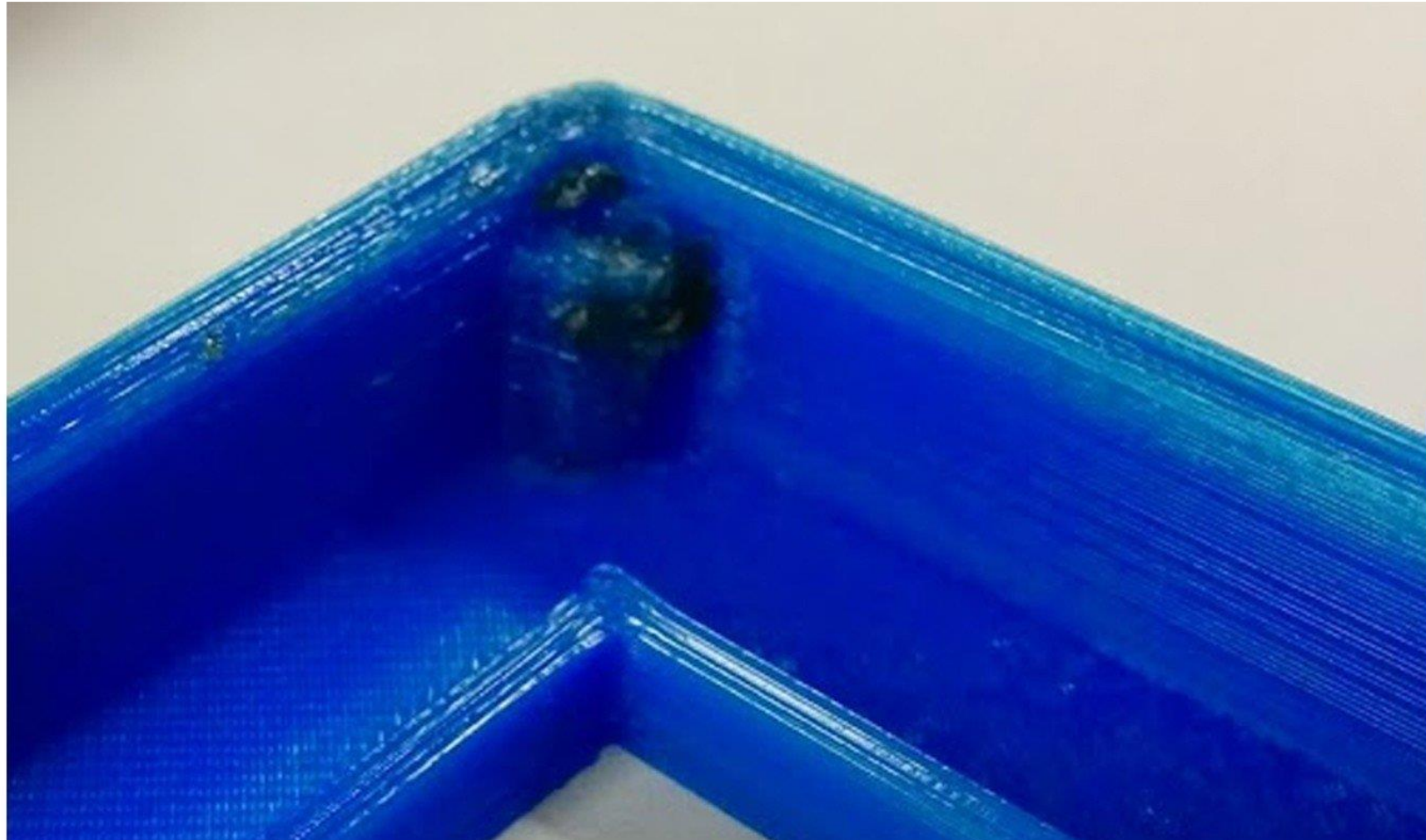
8. Problème de gouttes noires

Lors de l'impression 3D, il peut arriver que des gouttes noires apparaissent sur l'objet imprimé. Ce symptôme se manifeste par la présence de plastique brûlé (noirci) sur certains endroits de l'objet. La cause possible de ce problème est une mauvaise étanchéité du nozzle, ce qui entraîne l'écoulement de PLA ou d'ABS brûlé autour de la buse. Si vous constatez ce phénomène, il est important de prendre des mesures pour résoudre cette problématique.

Comment corriger ce problème, vous pouvez démonter la buse et refaire son étanchéité. Assurez-vous que toutes les pièces sont correctement assemblées et que la buse est bien serrée. Cela permettra d'éviter les fuites de matériau brûlé pendant l'impression. Si le problème persiste malgré cette manipulation, il est possible que la buse soit endommagée ou obstruée. Dans ce cas, il peut être nécessaire de le remplacer ou de le nettoyer en profondeur.

Il est important de noter que ces gouttes noires peuvent survenir avec différents types de matériaux d'impression, tels que le [PLA](#) et [l'ABS](#). Il est donc essentiel de vérifier l'étanchéité de la buse et de prendre les mesures appropriées pour éviter les fuites de filaments brûlés, quelle que soit la matière utilisée.

LA FABRICATION ADDITIVE



LA FABRICATION ADDITIVE

9. Problème de modèle qui se détache du plateau pendant

l'impression

Si votre modèle se détache fréquemment du plateau pendant l'impression, cela peut être dû à un problème d'adhérence. Cela peut se produire en raison d'un plateau mal calibré, d'un matériau inadapté ou d'un manque d'adhésif.

La solution pour résoudre ce problème est dans un premier temps, assurez-vous que votre plateau est correctement calibré et que la distance entre la buse et le plateau est appropriée. Utilisez également un adhésif tel que de la laque ou du ruban adhésif pour aider le modèle à rester en place pendant l'impression.

LA FABRICATION ADDITIVE

10. Problème de supports difficiles à retirer

Lors de l'impression de pièces complexes ou comportant des surplombs, l'utilisation de supports est souvent nécessaire. Cependant, retirer ces supports peut parfois être difficile et entraîner des dommages à la pièce.

Pour faciliter le retrait des [supports](#), vous pouvez ajuster les paramètres de votre logiciel de slicer pour générer des supports plus faciles à retirer. Vous pouvez également utiliser des pinces ou des outils spéciaux pour retirer les supports avec précaution, en évitant d'endommager la pièce.

LA FABRICATION ADDITIVE



LA FABRICATION ADDITIVE

L'impression multi-matériaux



https://igus.widen.net/content/nddd4juzjl/mp4/20200908_Multimaterial_3D_print_long_EN.mp4?quality=hd

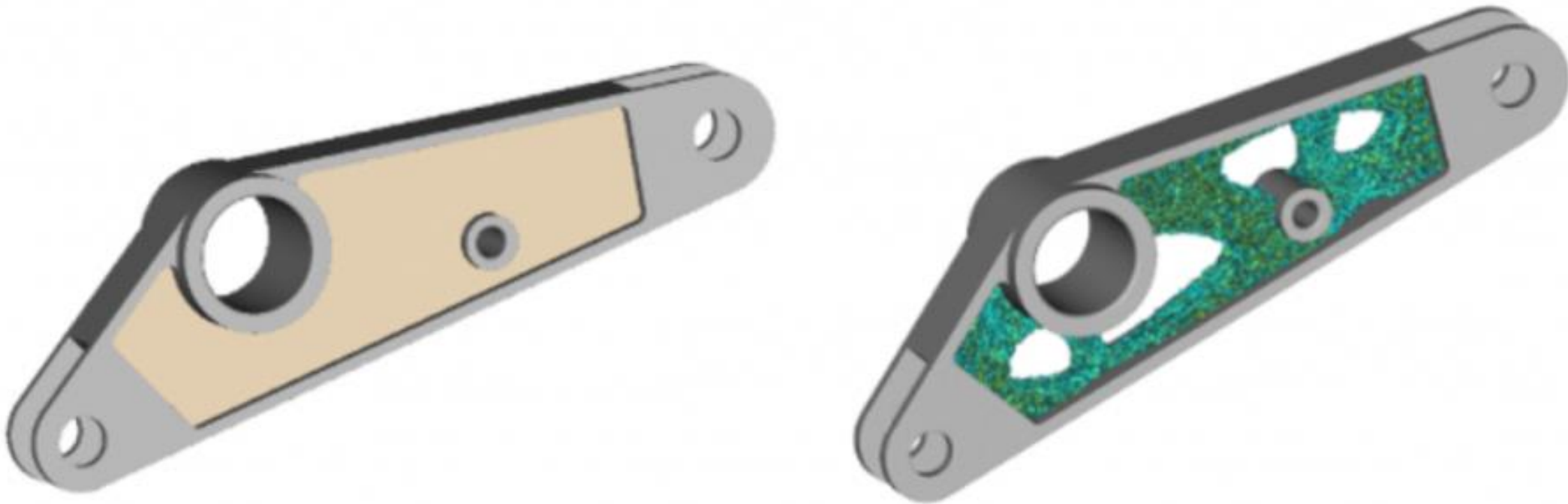
LA FABRICATION ADDITIVE



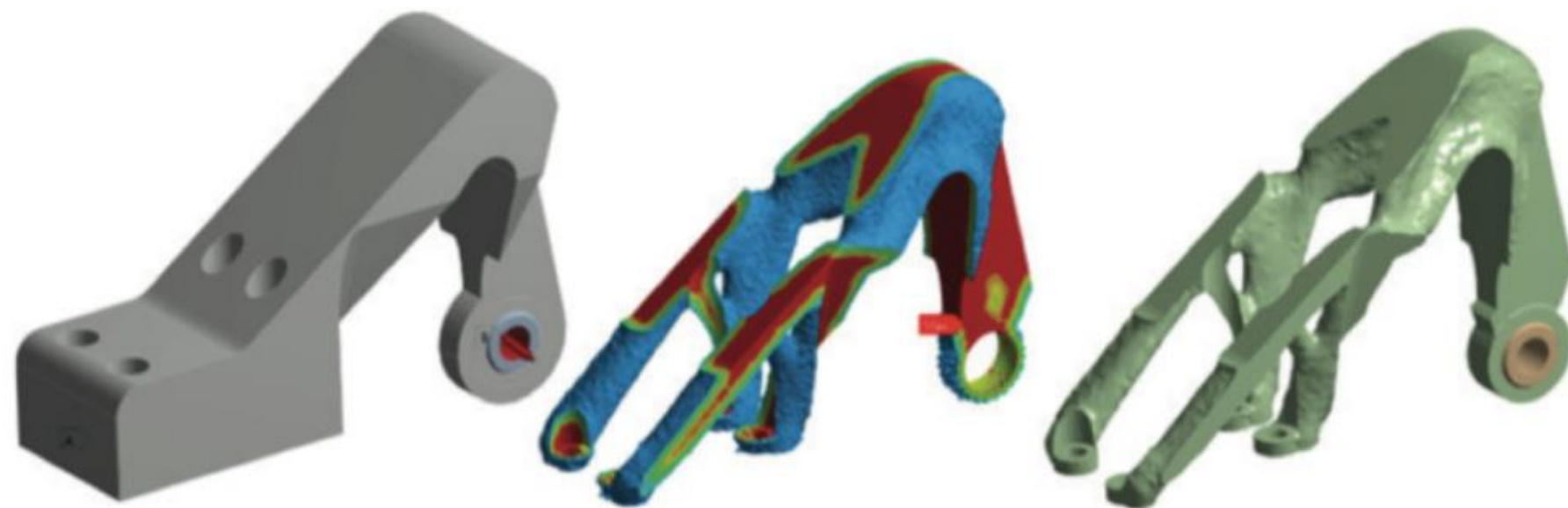
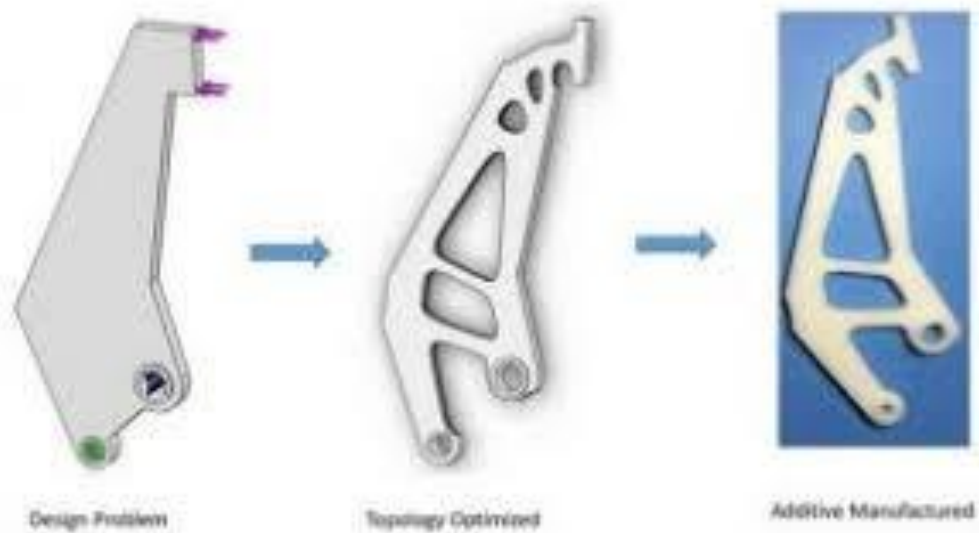
LA FABRICATION ADDITIVE

L'optimisation topologique

Ce procédé de conception consiste à diminuer au maximum la quantité de matière utilisée pour fabriquer la pièce étudiée, tout en conservant les surfaces fonctionnelles et la rigidité initiale de la pièce



LA FABRICATION ADDITIVE



LA FABRICATION ADDITIVE



LA FABRICATION ADDITIVE

<https://youtu.be/A-6Dtl9jwe4>

Vidéo : « la fabrication additive dans tous ses états »