



FRAMATECH

FORMATION FABRICATION ADDITIVE

CEA, ALDORIA

Charles GARNOT
Marseille
Jeudi 10 Octobre 2024



1



FRAMATECH

Présentation Charles GARNOT



p. 2 Octobre, 2024

(c) 2024 Charles GARNOT, FRAMATECH

2

2

Brève histoire de la Fabrication Additive, un voyage à travers le temps.

Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

3

3

Sommaire

1. Généralités
2. Le marché de la FA en France
3. La chaine de valeur et les risques
4. Les motivations (Animation)
5. Un peu plus de détails

Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

4

4

1. Généralités/Introduction

La fabrication additive cela vous parle ?

Et si je vous dis « **impression 3D** » !

Ces 2 termes sont synonymes, le 1^{er} est plus utilisé par les professionnels et le 2^{ème} par le grand public. C'est ce dernier que la plupart d'entre nous connaît.

Octobre, 2024

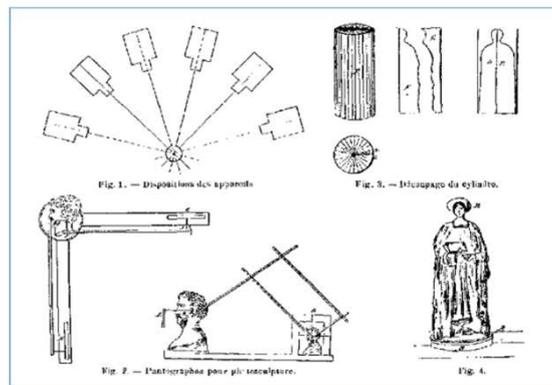
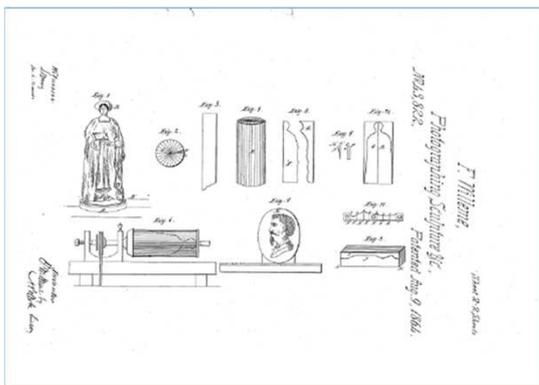
(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

5

5

La genèse de la Fabrication Additive : les visionnaires

L'ancêtre de l'impression 3D remonte aux années 1859-1860 lorsque **François Willème** inventa la **photosculpture**. Ce procédé permet d'obtenir une sculpture identique au modèle photographique. Voici comment cela fonctionne



Octobre, 2024

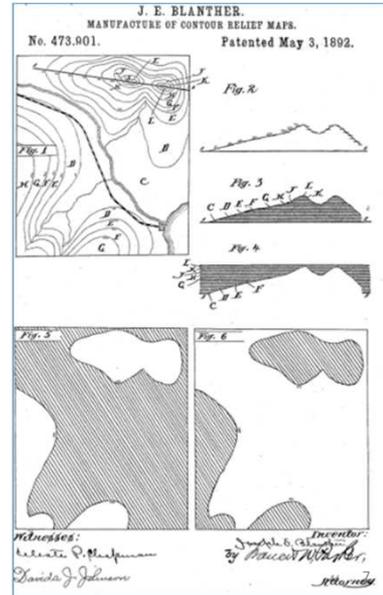
(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

6

6

La genèse de la Fabrication Additive : les visionnaires

Mais son **principe fondateur** remonte lui à **1890**. A cette époque, **J.E. Blanther** décide d'utiliser un procédé pour fabriquer des **cartes topographiques en 3D**. Pour obtenir le relief, le principe est d'utiliser des feuilles de cire découpées et empilées. Ensuite, on lisse pour obtenir les altitudes et les dépressions représentant les collines et les vallées.



Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

7

La genèse de la Fabrication Additive : les visionnaires

Dans cette fabuleuse histoire de l'impression 3D, la fabrication additive fit aussi parti de l'imaginaire d'Arthur C. Clarke (L'auteur de 2001 : l'Odyssee de l'espace) qui a déclaré en 1964 qu'un jour nous pourrions répliquer les objets comme on imprime un livre. Il a même donné un petit nom à cette machine : « The Replicator » !

Puis, c'est au tour d'Hergé, en 1972, de faire ressurgir ce concept avec l'invention du professeur Tournesol dans « Tintin et le Lac aux requins ». Vous vous souvenez de cette machine qui transforme une pâte spéciale en chapeau des Dupond et que les méchants veulent voler



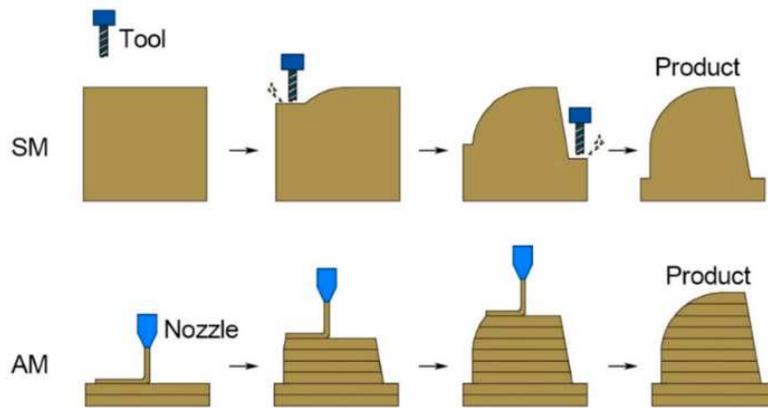
Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

8

8

Le principe de la Fabrication Additive



Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

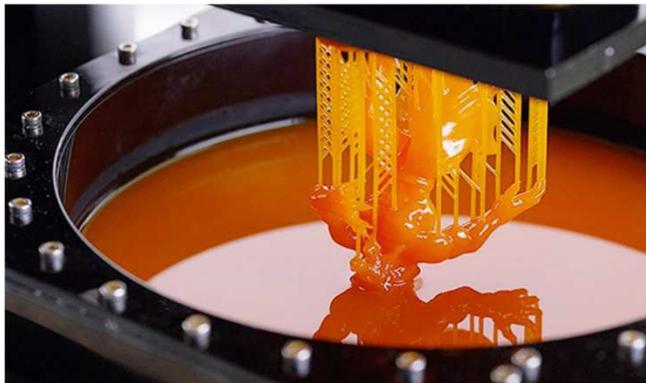
SM : Subtractive Manufacturing
AM : Additive Manufacturing

9

Années 80 : Les Prémices de l'impression 3D SLA par le Docteur Kodama

Tout débute **au Japon**, avec les expérimentations en prototypage rapide du **Docteur Hideo Kodama** de l'Institut Municipal de Recherche Industrielle de Nagoya.

En 1980, il pose les bases de ce qui allait devenir l'impression 3D en développant une technologie nouvelle pour créer des objets 3D en plastique avec pour principe de produire couche par couche, ce qui a ouvert la voie à la [Stéréolithographie](#) (SLA). Une résine photosensible, sous l'action d'une lampe UV, se polymérise.



Toutefois, pas de brevet déposé à ce moment-là, une date butoir manquée pour le dépôt de brevet l'en a empêché.

10

1984 : Le Premier Brevet d'Impression 3D, l'Émergence de la SLA

Le 16 juillet 1984 marque un tournant majeur dans l'histoire de l'impression 3D, avec le dépôt du premier brevet d'impression 3D, aussi appelée « **fabrication additive** ».

Premier brevet par CILAS (Compagnie industrielle des lasers) ALCATEL (1984) :

Ce sont des chercheurs français, Jean-Claude André, Olivier de Witte et Alain le Méhauté, qui ont agi au nom de l'entreprise **CILAS ALCATEL**, une société qui jouera un rôle crucial dans les débuts de l'impression 3D. Ce brevet a ouvert la voie à une révolution technologique qui allait façonner l'avenir de la conception et de la production. Fautes d'opportunités commerciales, ce brevet a été abandonné par CILAS ALCATEL.

Quelques semaines plus tard, Chuck Hull, aux États-Unis, déposait un brevet pour la Stéréolithographie (SLA). Ce brevet allait jouer un rôle clé dans la naissance de 3D Systems, une entreprise qui est aujourd'hui devenue un géant de l'impression 3D.

Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

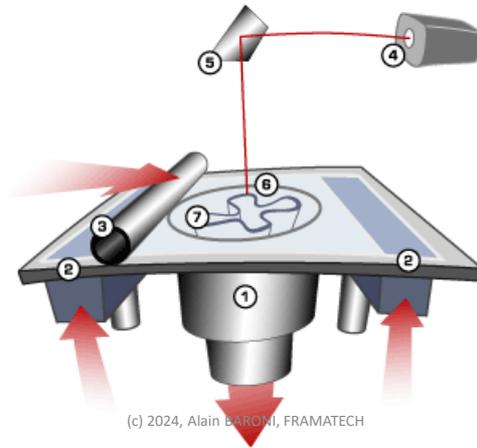
11

11

1987 : L'avènement du Frittage Laser Sélectif (SLS)

DTM Corp introduit le [frittage laser sélectif](#) (SLS). Cette méthode révolutionnaire permet de fabriquer des objets couche par couche à partir de poudres polymères, en utilisant un laser.

En parallèle, à l'Université du Texas, Carl Deckard dépose un brevet pour le **Frittage Sélectif par Laser (SLS)**. Cette technique implique la fusion de grains de poudre à l'aide d'un laser, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives.



Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

12

12

1988 : L'Essor du Dépôt de Fil Fondu (FDM)

Stratasys, fondée par Scott Crump, innove avec le procédé **Fused Deposition Modeling (FDM)**. Basé sur le dépôt de couches successives, ce procédé donnera naissance aux imprimantes 3D domestiques que nous connaissons aujourd'hui. En moins d'une décennie, les trois principales méthodes d'impression 3D sont brevetées, marquant ainsi la naissance officielle de cette technologie.



Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

13

13

1995 : Progression et Innovations Technologiques

L'année 1995 introduit le **Direct Metal Laser Sintering (DMLS)**, une technologie similaire au SLS mais adaptée aux métaux. En 2005, **ZCorporation** révolutionne l'impression 3D en présentant la première imprimante couleur, fonctionnant sur le principe de quadrichromie. L'impression par couches successives est rendue possible grâce à une matière minérale agrégée par un liant de colle.

En 2007, la technologie **MovingLight®** voit le jour, créée par **André-Luc Allanic**. Cette innovation donne naissance aux machines les plus précises et rapides du marché.



Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

14



14

2011 : Diversification et Applications Spécialisées

À partir de 2011, l'impression 3D entre dans de nouveaux domaines, notamment l'alimentaire. La société américaine **The Sugar Lab** ouvre la voie à l'impression en sucre.

En 2012, **Choc Edge**, basée en Angleterre, lance la première imprimante 3D chocolat.



Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH



15

15

2014 : Révolution dans la Construction

La Chine a fait sensation en annonçant la création de maisons à coût réduit grâce à l'impression 3D. Cette avancée a suscité un vif intérêt dans le secteur de la construction et de l'immobilier, ouvrant la voie à la **conception et à la production de structures complexes**.



Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

16

16

2014 : Tournant majeur.

De plus, en 2014, des brevets clés détenus par Stratasys et 3D Systems sont **arrivés à expiration**, libérant ainsi le potentiel de l'impression 3D. Ces brevets avaient limité le développement et l'accessibilité de cette technologie pendant des années. Cette expiration a facilité l'innovation pour d'autres entreprises, leur permettant de créer de nouvelles technologies et produits d'impression 3D sans les contraintes des brevets.

Cet événement a marqué un **tournant majeur dans l'industrie de l'impression 3D**, suscitant un nouvel engouement et une vague d'innovation. Elle a donné lieu au développement d'imprimantes 3D plus abordables et accessibles, favorisant ainsi la croissance du mouvement des makers. L'adoption de l'impression 3D s'est également accrue dans diverses industries, conduisant à la prolifération de prototypes, de produits et de composants imprimés en 3D. Ce moment clé a contribué à démocratiser la technologie de l'impression 3D et a stimulé une période de créativité et d'expérimentation sans précédent au cours des années suivantes.

Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

17

17

2. Le marché de l'impression 3D en France en 7 chiffres clefs

La France, 4ème marché mondial de la Fabrication Additive

Si la France compte un nombre réduit de fabricants d'imprimantes 3D sur son territoire par rapport aux Etats-Unis ou la Chine, et même certains de ses pays voisins, elle n'a pas à rougir de ses performances sur l'échiquier mondial.

Dans son dernier rapport sur le marché de la fabrication additive en 2019, le cabinet d'étude SmarTech Analysis classe en effet l'hexagone comme le 4ème pays dans le monde ayant généré le plus de revenus l'année précédente. Soit au total plus de 489 millions d'euros de chiffre d'affaires.

Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

18

18

Le marché de l'impression 3D en France en 7 chiffres clefs



Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

19

19

Le marché de l'impression 3D en France en 7 chiffres clefs



Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

20

20

Plastiques et Composites

Tandis que 70% des français interrogés connaissent la fabrication additive, avec 42 % d'adoption, la France se classe 2ème juste derrière la Chine. En revanche l'hexagone n'est pas un grand investisseur. Lorsque l'on s'intéresse à la progression des investissements sur le territoire tricolore, la France chute à la 7ème place derrière des pays comme le Mexique ou l'Italie.

Les matériaux plastiques et polymères employés à 87 % et les composites 26 %

Toujours selon la même étude menée par Ultimaker, on apprend que les entreprises françaises qui ont recours à la fabrication additive utilisent les plastiques et les polymères pour 87%. Avec respectivement 26% et 25%, l'utilisation de composites et la fibre de carbone pour l'impression 3D ne cesse de prendre de l'ampleur dans les pratiques des professionnels. Leur légèreté et leur solidité en font une alternative intéressante pour remplacer le métal.

Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

21

21

Beaucoup de pièces finies

Les pièces d'utilisation finale représentent 48 % des cas d'application

Selon le 3D Printing Sentiment Index, en France comme partout ailleurs dans le monde, avec 76 % des cas d'utilisation, la fabrication additive est encore principalement utilisée à des fins de prototypage. L'impression 3D de pièces d'outillage (moules, inserts gabarits, pinces...) arrive en seconde position avec un taux de 65 %. Un chiffre guère surprenant quand on sait qu'un cinquième des entreprises actives dans les secteurs aéronautique, automobile, mécanique et ingénierie ont aujourd'hui recouru à des solutions additives pour imprimer leur propres outillages.

Les données fournies par Ultimaker confirment une autre tendance claire observée ces dernières années, à savoir que la production de pièces finies par impression 3D ne cesse de gagner du terrain dans les applications. Selon le fabricant hollandais elle s'élèverait à 48 % sur le sol français. L'évolution des matériaux et des technologies, toujours plus abordables et performants, expliquent pour une grande partie cette dynamique. La meilleure compréhension des industriels sur les bénéfices procurés y participe également. A titre de comparaison, la fabrication de pièces d'utilisation finale par les entreprises n'était que de 17 % en 2015.

Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

22

22

FA métal en France : un marché de 122M€

Grâce à des donneurs d'ordres importants dans le domaine de l'aéronautique et automobile, le marché français de la fabrication additive métallique parvient à suivre la tendance mondiale avec une forte dynamique sur ce segment. Estimé selon un rapport de Pipame à 60,6 millions d'euros en 2018 le marché de l'impression 3D métal en France montre une activité encore peu structurée avec des équipements produisant peu de pièces. En 2018 la répartition était la suivante : 30 % pour les poudres, 40 % pour les équipements et 30 % pour la fabrication de pièces.

Malgré le nombre très restreint de constructeurs de machines (Prodways, AddUp...) présents sur le territoire, la filière française se structure peu à peu, avec plusieurs acteurs qui commencent à se regrouper. C'est la raison pour laquelle la croissance du marché français devrait doubler d'ici 2025 pour atteindre les 122 millions €.

Suite au développement de la filière, la fabrication de pièces métalliques pourrait s'élever jusqu'à 50 %, soit 61 millions € de revenus générés, 30 % pour les équipements et 20 % pour les poudres.

Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

23

23

FA Métal : une technologie de fabrication à part entière

La fabrication additive métallique est de plus en plus considérée comme un procédé de fabrication à part entière.

Avec cette technologie, il est possible de créer des formes et des géométries complexes qui étaient trop difficiles voire impossibles à fabriquer avec les technologies conventionnelles.

Plus généralement, les capacités uniques des technologies de fabrication additive offrent de nouvelles possibilités de personnalisation, d'amélioration très significative des performances des produits, de multifonctionnalité et de réduction des coûts globaux de fabrication.

Le défi est de développer de nouvelles méthodes de conception et de design bien spécifiques à la fabrication additive.

Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

24

24

3. La chaîne de valeur en fabrication additive

La mise en œuvre d'un processus de production par fabrication additive métallique nécessite plus que l'installation et l'utilisation d'une imprimante. L'ensemble de la chaîne de valeur doit être prise en compte lors de la production. Les étapes du procédé de fabrication additive métallique dépendent de nombreux facteurs, notamment la technologie, l'équipement, l'application. Le workflow ci-dessous est valable dans la plupart des cas. Il est divisé en cinq étapes principales : la conception et design, la préparation des données, la fabrication–impression 3D, le post-traitement et finalement le contrôle qualité.



Octobre, 2024

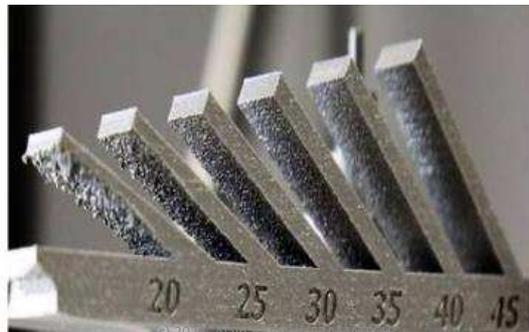
(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

25

25

Le design pour la fabrication Additive

Le design pour la fabrication additive (Design For Additive Manufacturing DFAM) est une nouvelle approche en conception des pièces par impression 3D qui tend à mettre en relief le besoin de modifier la façon dont les concepteurs conçoivent leurs pièces. La conception pour la fabrication additive propose de se libérer des règles et des méthodes de fabrication traditionnelles. Les concepteurs doivent ainsi penser d'une autre manière, notamment tenter d'imaginer l'intégration de leur pièce dans son environnement, afin de voir s'il existe des façons nouvelles et différentes de combiner efficacement plusieurs pièces en une seule. Il existe des règles générales de conception pour la fabrication additive, qui ont pour but d'orienter le concepteur dans sa démarche. Presque toutes les formes de fabrication additive sont concernées par ces règles générales de tracé.



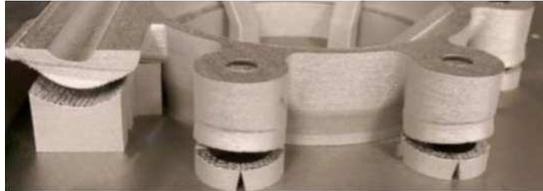
Octobre, 2024

26

26

Minimiser les contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles ont un impact significatif sur la qualité de la pièce. En effet, durant le processus de fabrication, l'apport important en énergie (la source laser en SLM) et la lente évacuation thermique de chaleur dans les couches voisines entraînent de forts gradients thermiques et provoquent des contraintes résiduelles. Ces dernières peuvent provoquer des défauts comme les fissurations.



Plusieurs paramètres peuvent avoir un impact sur la qualité des pièces issues de la fabrication additive. Les influences diverses de ces paramètres peuvent être anticipées dès la phase de conception du produit. Par exemple, le choix des stratégies de lasage (parcours et caractéristiques du faisceau de chauffe) a un impact direct sur l'apparition des défauts, comme notamment la fissuration ou le délaminage. En effet, une mauvaise stratégie de lasage augmente la concentration des contraintes résiduelles dans la pièce, ce qui favorise l'apparition de défauts. Le processus de fusion, dans le cas du procédé SLM, dépend du matériau et des paramètres énergétiques, tels que la puissance du laser, la vitesse ou encore la stratégie de scan. En vue de minimiser les contraintes résiduelles, il est recommandé de choisir une stratégie de lasage adaptée, éviter les grandes surfaces ininterrompues ou faire attention aux changements de sections transversales.

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

27

27

Bien « orienter » sa pièce

La qualité finale de la pièce issue de la fabrication additive – propriétés mécaniques, état de surface, ... – est directement liée au choix de l'orientation de la pièce.

Lors de la conception, il est indispensable de penser en permanence à l'orientation dans laquelle la pièce sera produite. L'orientation détermine en effet la direction de l'anisotropie, un facteur important qu'il faut par conséquent prendre en compte dans le processus de fabrication. La pièce doit être ainsi orientée de manière à ce que ses caractéristiques mécaniques exigées soient satisfaites par rapport au cahier des charges initiales. Ceci est particulièrement vrai pour l'ensemble des procédés de fabrication additive et notamment pour le procédé SLM, en raison de la structure de support nécessaire, du gauchissement des composants et de l'orientation en fonction de la qualité de surface.

Il est recommandé de choisir des orientations d'impression autoportantes pour les pièces car cela minimisera le besoin en supportage et par conséquent les opérations supplémentaires de post-traitement.

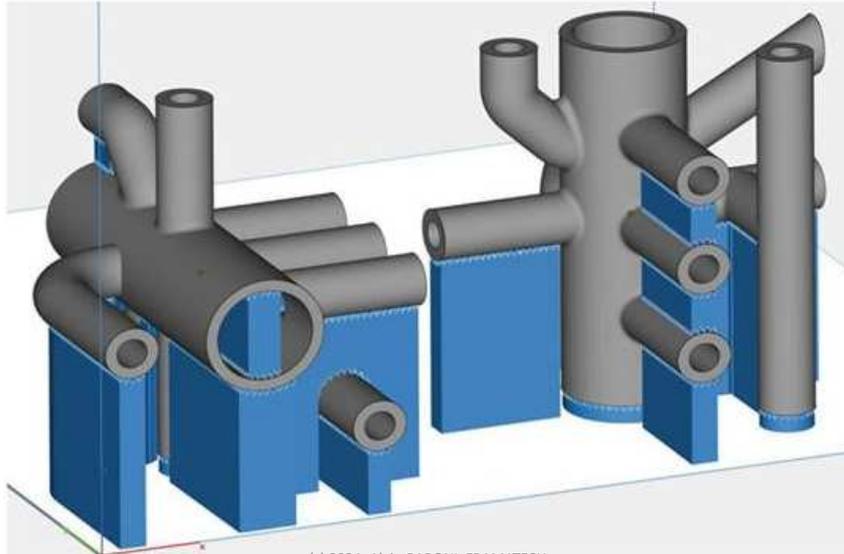
Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

28

28

Bien « orienter » sa pièce



Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

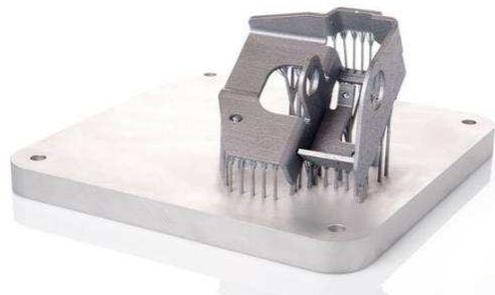
29

29

Minimiser et adapter les supports

Lors de la conception d'une pièce pour la fabrication additive métallique, particulièrement sur lit de poudre, il est important de minimiser le besoin en supports. Cette règle est même indispensable notamment pour les canaux intérieurs, afin que ces derniers ne puissent pas être remplis avec des supports qui ne peuvent pas être enlevés à la fin de la fabrication.

Les supports servent à supporter la pièce et à fixer les surfaces et les géométries non autoportantes, ainsi qu'à évacuer la chaleur de la structure induite par l'apport thermique. La deuxième fonction principale des supports est de minimiser les déformations induites par des contraintes résiduelles causées par le fort gradient thermique, qui provoquent un gauchissement et un écart dimensionnel par rapport à la CAO. Il est important de noter que la conductivité thermique et les contraintes de flexion causées par la chaleur sont différentes pour chaque matériau. Cela signifie que la nature des supports ainsi que leur rigidité doivent être adaptées pour chaque matériau.



Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

30

30

Améliorer l'état de surface

L'état de surface brute des pièces métalliques fabriquées par fusion sur lit de poudre n'est généralement pas adapté en l'état pour être utilisé directement, en particulier pour les surfaces fonctionnelles et les surfaces critiques en fatigue.

La qualité de surface des pièces issue de la fabrication par fusion sur lit de poudre peut être impactée directement par le choix de l'orientation des pièces, par la géométrie non adaptée à la fabrication additive et par les paramètres de la mise en couche et le choix de la granulométrie de la poudre. Lorsque ces pièces doivent être utilisées dans des produits finis, un post-traitement éventuel doit être envisagé dès les premières étapes du processus. Le concepteur doit ainsi prendre en compte le post-traitement dans la phase de conception de la même manière que pour la conception des surépaisseurs d'usinage par exemple.

Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

31

31

Une liberté de formes, mais des contraintes de design

Le design pour la fabrication additive notamment pour le procédé de fusion sur lit de poudre nécessite une connaissance du processus de fabrication, de comportement des matériaux en plus des règles de conception standard. Bien que le procédé SLM offre une liberté de conception, il impose également de nombreuses contraintes de fabrication pour la conception et le design des composants métalliques.

Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

32

32

4. Les motivations à maîtriser la FA

1. Stimuler l'Innovation
2. Augmenter la réactivité
3. Réparer
4. Tout fabriquer
5. Coût ?

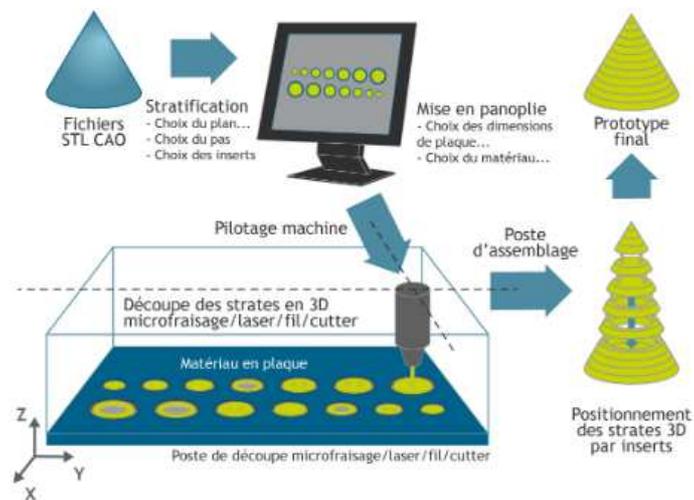
Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

33

33

5. Un peu plus de détails/La stratoconception



Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

34

34

Norme ASTM volume 10.04

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.

Ce comité considère 7 procédés de fabrication additive selon une classification reconnue internationalement :

- 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 matériaux 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.

Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

35

35

Extrusion de matière : 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.



Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

36

36

FDM et FFF/Tête d'impression : Simple buse



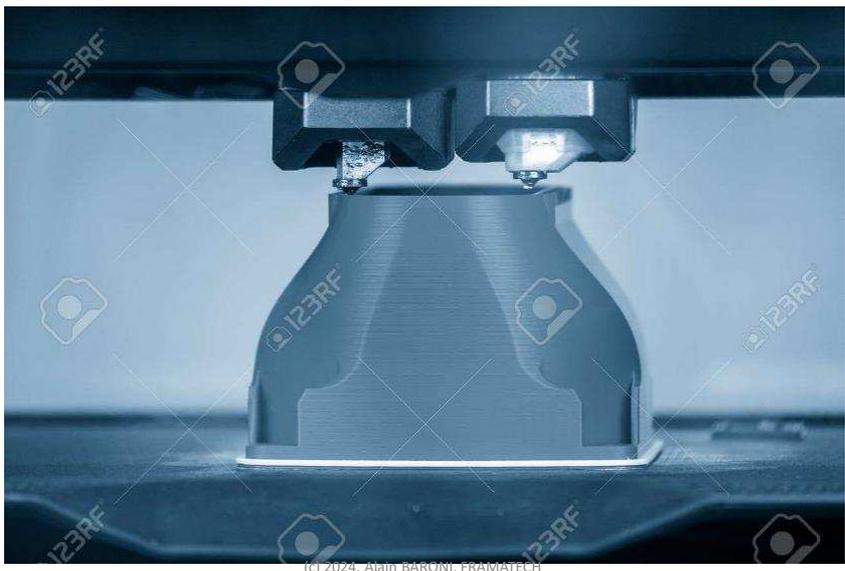
Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

37

37

FDM et FFF/Tête d'impression : Double buse



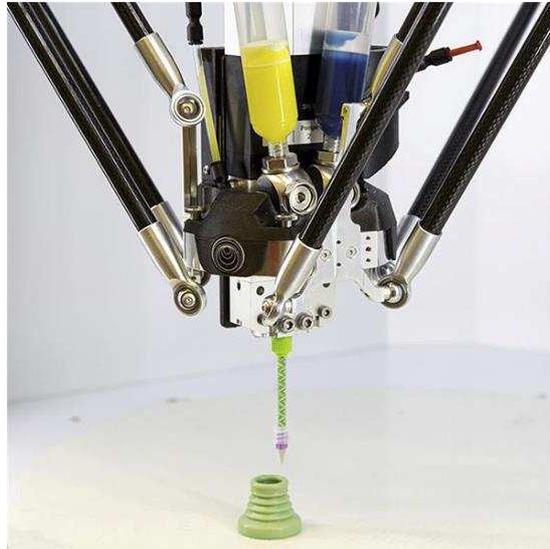
Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

38

38

FDM et FFF/Tête d'impression : Seringue



Octobre, 2024

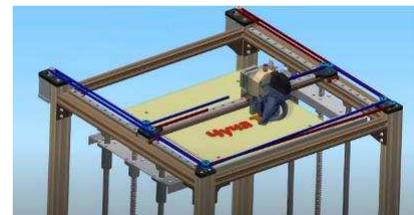
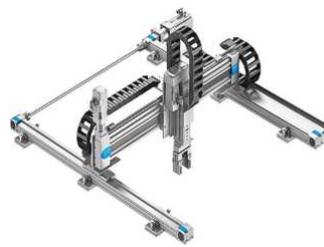
(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

39

39

FDM et FFF/Déplacement de la tête d'impression : Cartésien

Il s'agit sans aucun doute du type d'imprimante FDM le plus courant sur le marché. Elles sont ainsi appelées en raison du système de coordonnées cartésiennes qu'elles utilisent. Celui-ci se compose de trois axes orthogonaux – les axes X, Y et Z – qui servent à déterminer où et comment la tête d'impression doit se déplacer correctement et donc à corriger la direction du mouvement. Selon le modèle et le fabricant de l'imprimante, le plateau d'impression de cette machine sera en charge de l'axe Z, permettant à l'extrudeur de se positionner sur les axes X et Y, afin de pouvoir se déplacer dans trois directions. Dans cette catégorie, nous trouvons certaines des marques les plus connues du secteur comme Ultimaker et Makerbot. Le principal avantage de ces solutions est qu'elles sont généralement assez peu coûteuses, et qu'elles sont même vendues en kit pour pouvoir être construites à la main.



Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

40

40

FDM et FFF/Déplacement de la tête d'impression : Polaire

La différence entre cette machine et les machines cartésiennes est que celle-ci utilise des coordonnées polaires pour l'impression 3D. Les ensembles de coordonnées décrivent des points sur une grille circulaire au lieu d'un carré, non pas déterminés par les axes X, Y et Z, mais par l'angle et la longueur. Cela signifie que le plateau tourne et se déplace en même temps dans une seule direction. L'extruder bouge de haut en bas. Grâce à leur surface rotative, ces imprimantes sont idéales pour les objets qui suivent une spirale. Un avantage des solutions polaires est qu'elles peuvent fonctionner avec seulement deux moteurs, alors qu'une imprimante cartésienne ou delta nécessite un moteur par axe, ce qui permet de réaliser des économies à long terme. Un autre point positif est que l'imprimante peut avoir un volume d'impression plus important. Cependant, le principal problème des machines polaires est leur précision. Comme elles tournent en cercle, il y a beaucoup plus de précision au centre que dans la zone extérieure.



Octobre, 2024

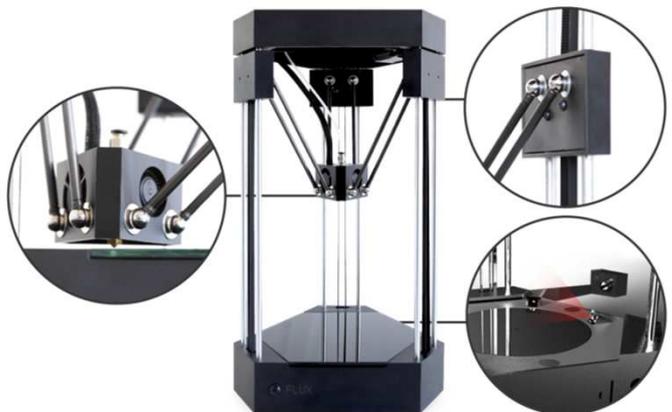
(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

41

41

FDM et FFF/Déplacement de la tête d'impression : Delta

L'imprimante 3D de type Delta est très populaire dans la communauté des makers. Elles fonctionnent avec des coordonnées cartésiennes et leurs principales caractéristiques sont le plateau d'impression circulaire combiné à l'extrudeur qui est fixé sur le dessus dans une configuration triangulaire, d'où le nom Delta. Chacun des trois bras peut se déplacer de haut en bas, de gauche à droite, déterminant ainsi la position et la direction de la tête d'impression. Par conséquent, les limites de fabrication de ces machines sont uniquement définies par le diamètre de la base et la hauteur des bras. Les imprimantes 3D Delta ont été conçues pour augmenter la vitesse d'impression, et avec un plateau d'impression fixe, cela peut être utile pour certains projets. Un autre avantage des imprimantes Delta est qu'elles sont redimensionnables, sans affecter la qualité. Attention toutefois, elles peuvent être plus difficiles à calibrer.



Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

42

42

FDM et FFF/Déplacement de la tête d'impression : Bras robotisé

Il existe actuellement de nombreux bras robotisés utilisés à des fins industrielles sur une chaîne de montage automobile, mais leur fonction principale est l'assemblage de pièces et non l'extrusion de filaments. L'impression avec un bras robotique est encore en cours de développement et n'a été mise en œuvre que dans quelques entreprises. C'est principalement le secteur de la construction qui l'utilise. Cependant, cette méthode de fabrication additive FDM est de plus en plus populaire, car elle ne nécessite pas de plateau d'impression fixe et permet une plus grande mobilité. Le principal avantage de l'impression 3D avec des bras robotisés est l'automatisation des processus de production, plus rapidement et plus facilement. Le mouvement de la tête d'extrusion est également extrêmement flexible, ce qui ouvre de nombreuses nouvelles possibilités pour des conceptions complexes. Cependant, la qualité est encore loin d'être celle d'une imprimante cartésienne, de nombreuses entreprises travaillent à son développement.



Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

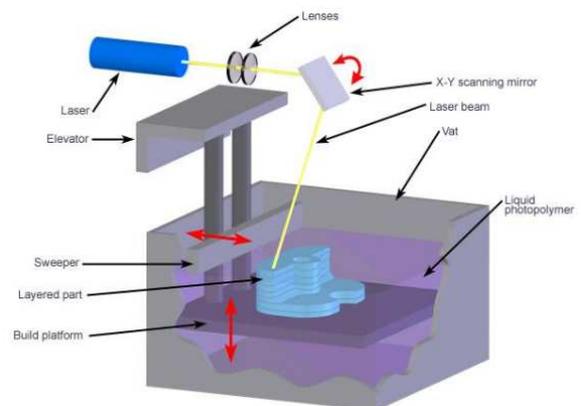
43

43

Photo-polymérisation

Le procédé d'impression 3D par photo-polymérisation (stéréolithographie ou SLA pour Stéréolithographie Apparatus (Appareil)) 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).



Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

44

44

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.



Octobre, 2024

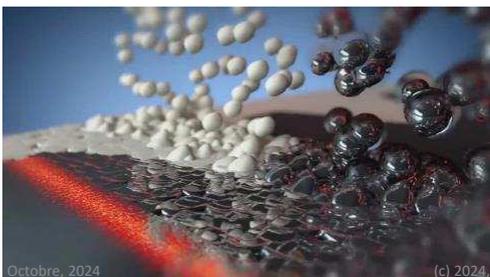
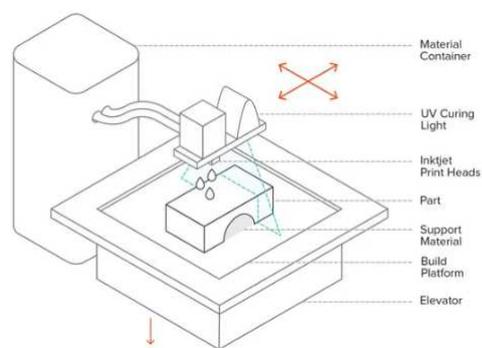
(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

45

45

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.



Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

46

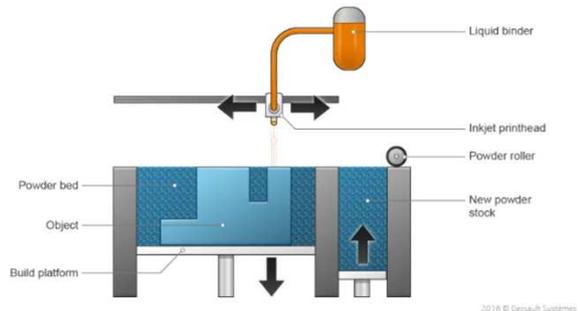
Dans l'ensemble, cette technique est surtout adaptée à du prototypage, car la tenue dans le temps des objets produits n'est pas très bonne.

46

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 cyanoacrylate. 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.

47

Stratification de matériaux 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.

Octobre, 2024

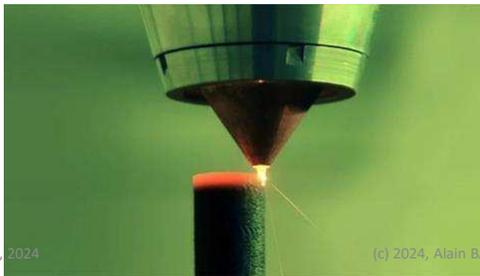
(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

48

48

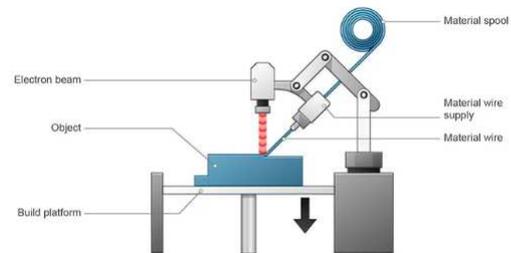
Dépôt de matière sous énergie concentrée

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.



Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH



Ce type de procédé est très peu répandu.

49