

CYCLE PERFORMANCE DIGITALE



FRAMATECH

MAÎTRISEZ LA FABRICATION ADDITIVE

Les 10 et 11 octobre 2024

A Marseille

FRAMATECH S.A. au capital de 38112 Euros

Etudes & mises en œuvre de stratégies industrielles internationales - Hautes Technologies

4 Boulevard d'Arras - 13004 Marseille - France

Tél. +33 491 95 55 70 | Mail : contact@framatech.fr | Web : www.framatech.fr

Organisme de formation n° 93060115506 – Siret 344 351 879 00046 – NAF : 7112B

CYCLE PERFORMANCE DIGITALE



FRAMATECH

MAÎTRISEZ LA FABRICATION ADDITIVE

NOTE POUR LE LECTEUR QUI N'AURAIT PAS ASSISTÉ AU SEMINAIRE

La documentation ci-jointe est celle qui a servi de support pour illustrer les exposés faits pendant le séminaire « **MAÎTRISEZ LA FABRICATION ADDITIVE** », et ne représente donc qu'une partie des informations données à cette occasion.

FRAMATECH S.A. au capital de 38112 Euros

Etudes & mises en œuvre de stratégies industrielles internationales - Hautes Technologies

4 Boulevard d'Arras - 13004 Marseille - France

Tél. +33 491 95 55 70 | Mail : contact@framatech.fr | Web : www.framatech.fr

Organisme de formation n° 93060115506 – Siret 344 351 879 00046 – NAF : 7112B

Formation

MAÎTRISEZ LA FABRICATION ADDITIVE



Partie I

*Exposé de Charles GARNOT
Le 10 octobre 2024 (MATIN)*

**FRAMATECH S.A. au capital de 38112 Euros
Etudes & mises en œuvre de stratégies industrielles internationales
Hautes Technologies**

4 Boulevard d'Arras - 13004 Marseille - France
Tél. +33 491 95 55 70 / Fax. +33 491 95 55 75 / Mail : contact@framatech.fr
Organisme de formation n° 93060115506 – Siret 344 351 879 00046 – NAF 742C – RC88B126
Web : www.framatech.fr

 **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

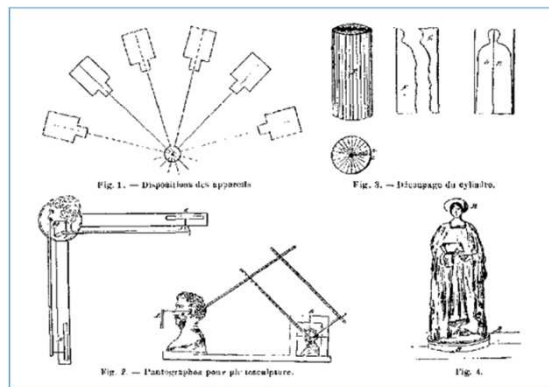
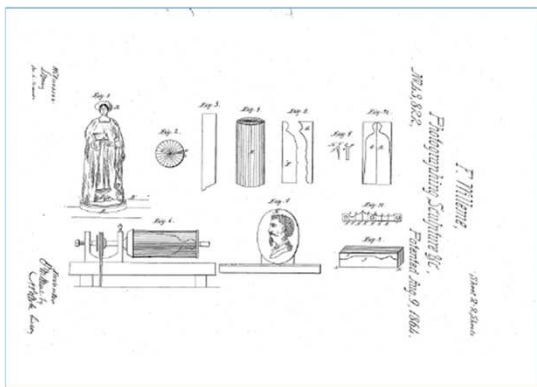
(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

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

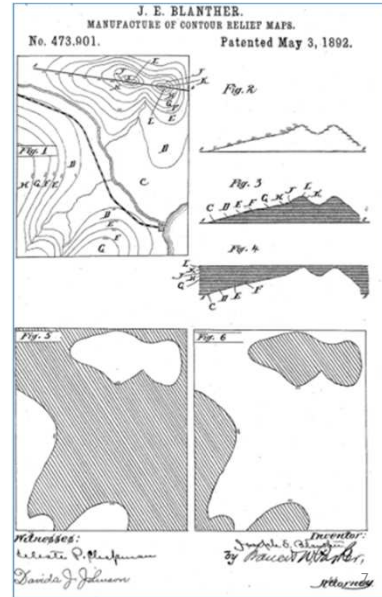
(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

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'Odysée 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

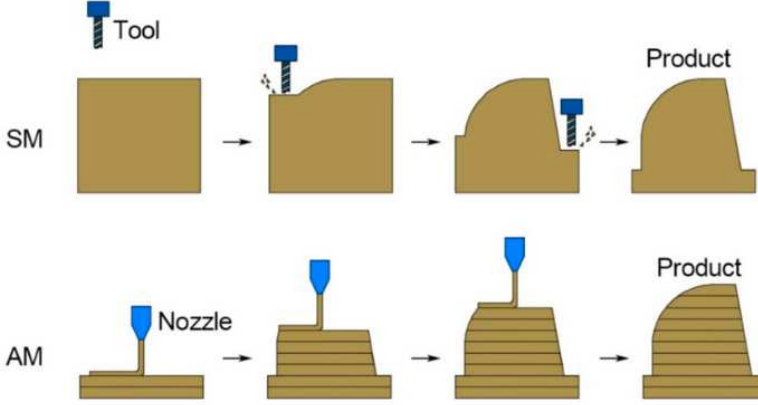
(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

8

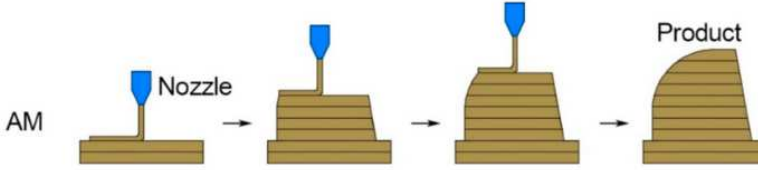
8

Le principe de la Fabrication Additive

SM



AM



SM : Subtractive Manufacturing
AM : Additive Manufacturing

Octobre, 2024 (c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

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.



Toute fois, 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

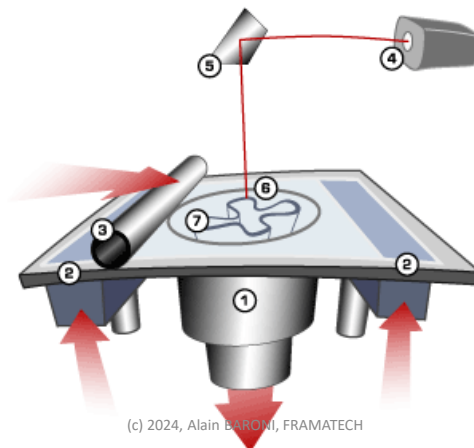
11

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

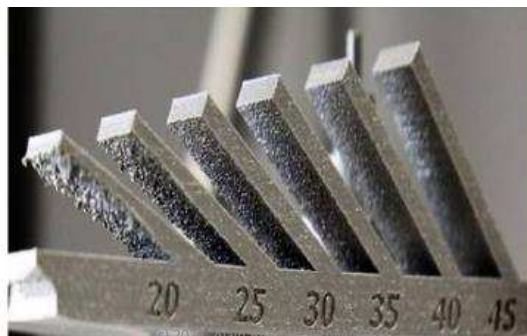
(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

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.



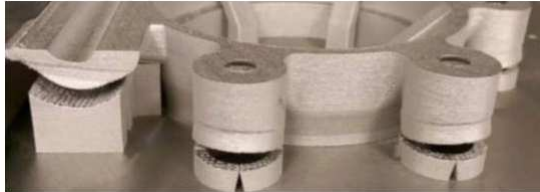
Octobre, 2024

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.

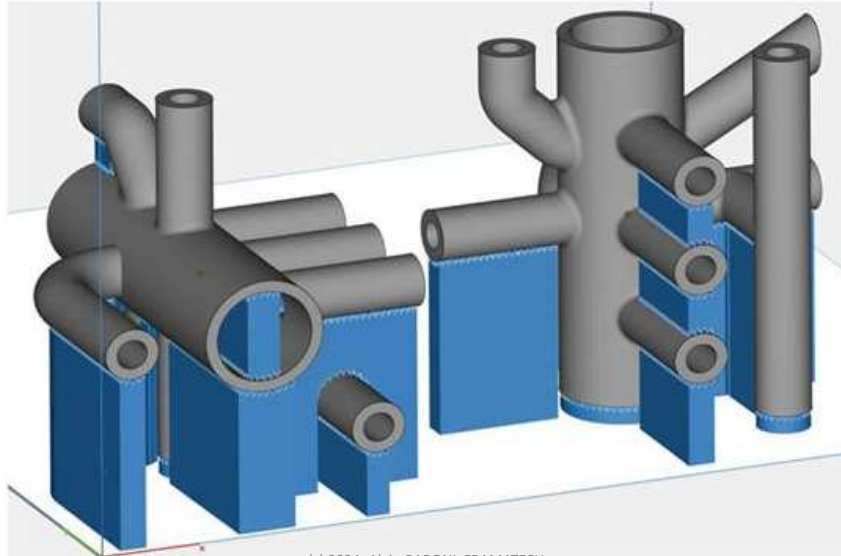
Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

28

28

Bien « orienter » sa pièce



Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

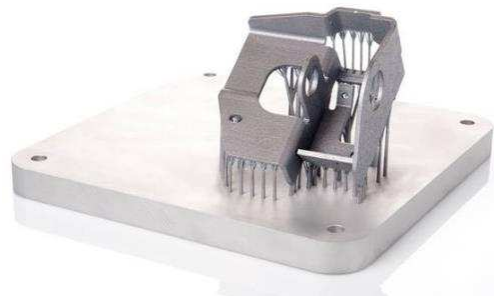
29

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 ?

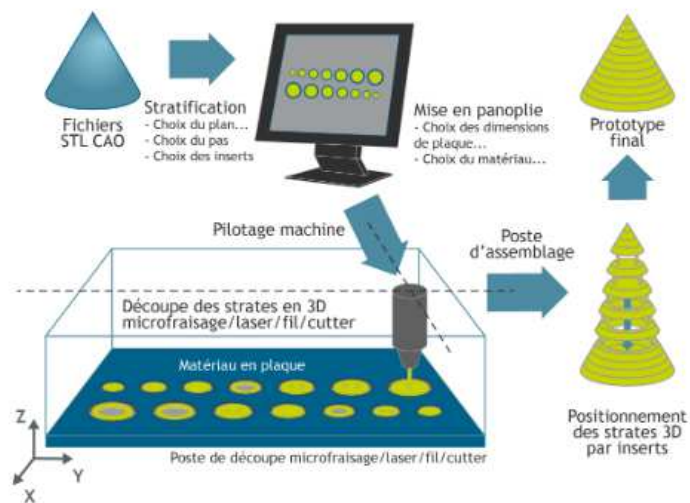
Octobre, 2024

(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



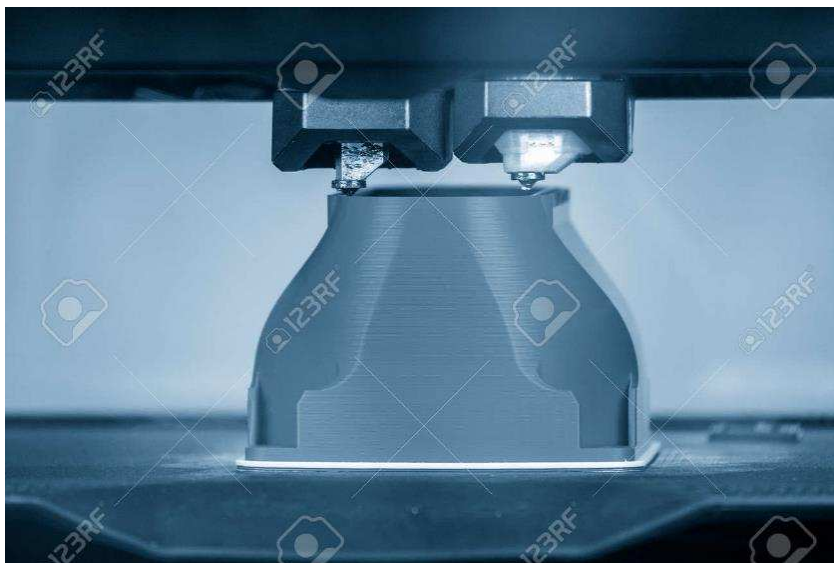
Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

37

37

FDM et FFF/Tête d'impression : Double buse



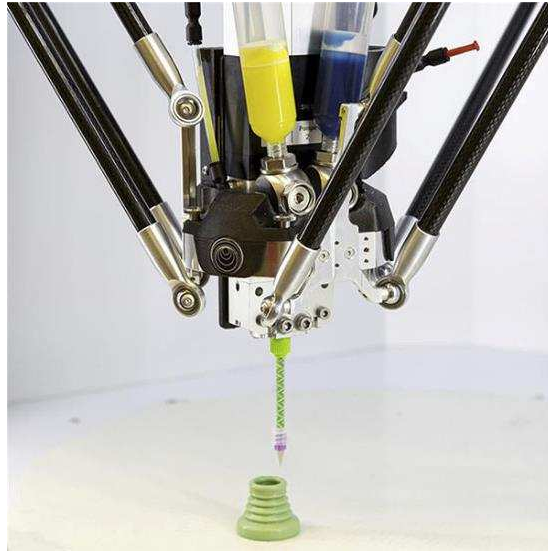
Octobre, 2024

(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

38

38

FDM et FFF/Tête d'impression : Seringue



Octobre, 2024

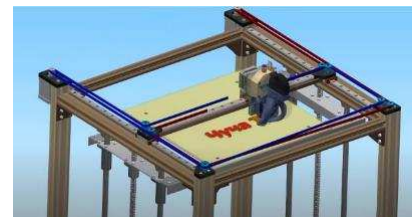
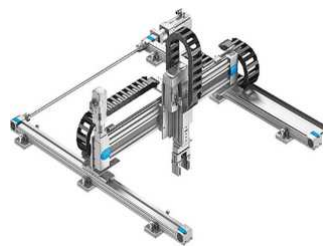
(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

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

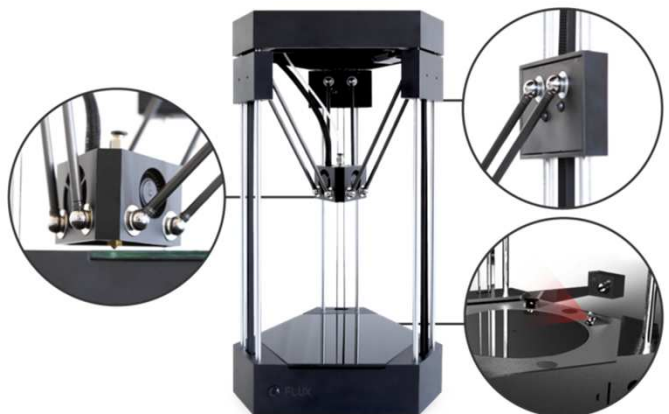
(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

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

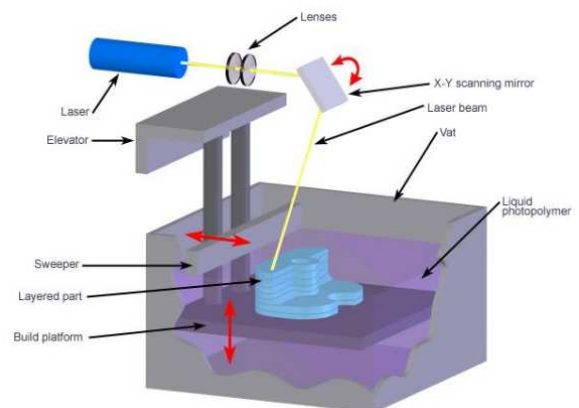
43

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

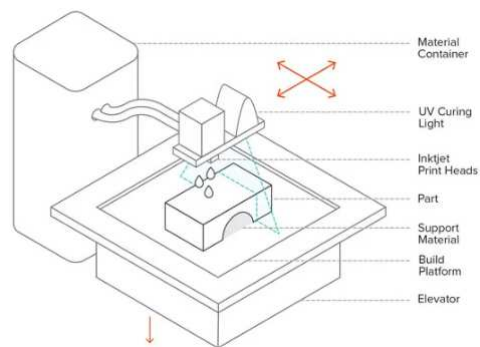
(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

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

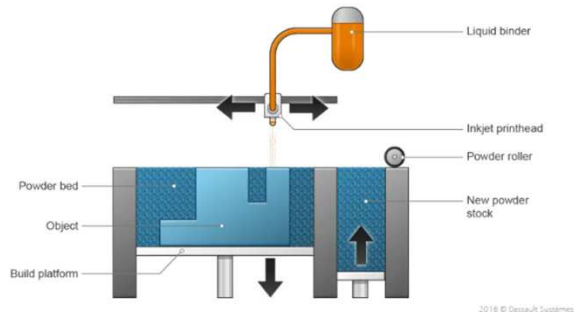
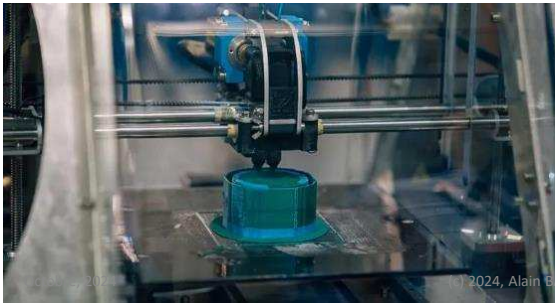
Dans l'ensemble, cette technique est surtout adaptée à du prototypage, car la tenue dans le temps des objets produits n'est pas très bonne.

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

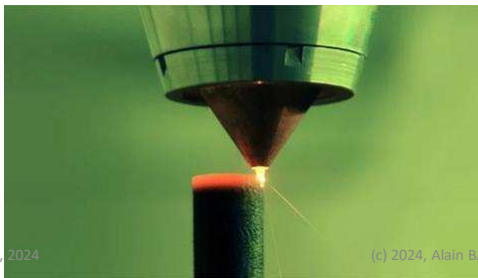
(c) 2024, Alain BARONI, FRAMATECH

48

48

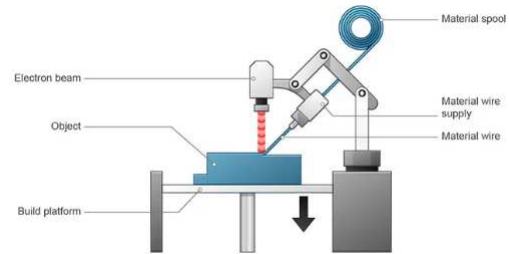
Dépôt de matière sous énergie concentrée

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

Formation

MAÎTRISEZ LA FABRICATION ADDITIVE



Partie II

*Exposé de Emeric LIGNIER
Le 10 octobre 2024 (APRES-MIDI)
Et Le 11 octobre 2024*

**FRAMATECH S.A. au capital de 38112 Euros
Etudes & mises en œuvre de stratégies industrielles internationales
Hautes Technologies**

4 Boulevard d'Arras - 13004 Marseille - France
Tél. +33 491 95 55 70 / Fax. +33 491 95 55 75 / Mail : contact@framatech.fr
Organisme de formation n° 93060115506 – Siret 344 351 879 00046 – NAF 742C – RC88B126
Web : www.framatech.fr




FRAMATECH

INTEGREZ LA FABRICATION ADDITIVE DANS VOS PROCESS INDUSTRIELS

Etat des lieux, coûts, fabrication, contrôle qualité



1



FRAMATECH

Sommaire

PARTIE I – Introduction à la FA

PARTIE II - Intégration de la fabrication additive dans l'organisation industrielle

PARTIE III – Règles de conception


PARTIE IV – Les différentes opérations en Production

Partie V – Le post-traitement (process & précautions)

Partie VI – Les moyens de contrôle non destructif


Objectifs :

- ✓ Connaître les process de conception et de fabrication de pièces techniques en fabrication additive
- ✓ Savoir opérer les choix technologiques et matériels
- ✓ Savoir intégrer la fabrication additive dans un processus industrie




*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*

2



FRAMATECH

Introduction à la FA



*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*

La genèse de l'impression 3D et la FA


Etat de l'art de l'innovation

Les différents procédés FA (SLA, DLP, FDM, SLS, MJF, SLM, MBJ)

Etat des lieux des machines (prix, volumes de production, matériaux,...)

Panorama du marché, les secteurs industriels concernés et les usages


3



FRAMATECH

Introduction à la FA

La genèse de l'impression 3D et la FA



*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*

La genèse de l'impression 3D et la FA


Un petit peu d'histoire :
L'impression 3D, aussi connue sous le nom de fabrication additive (FA), trouve ses racines dans les années 1980.

En 1984, Charles Hull, un ingénieur américain, a inventé la **stéréolithographie (SLA)**, la première technologie d'impression 3D. Il a développé un procédé où la lumière UV est utilisée pour durcir des couches de résine photopolymère liquide afin de créer des objets en trois dimensions. Il a aussi créé et Breveté le format STL.

Dans les années 1990 : Plusieurs autres technologies de fabrication additive ont vu le jour, notamment le **frittage sélectif par laser (SLS)**, inventé par Carl Deckard à l'Université du Texas. Le procédé utilise des lasers pour fondre des matériaux en poudre afin de créer des objets couche par couche.

L'impression 3D par dépôt de filament fondu (**FDM**), développée par Scott Crump en 1989, est devenue l'une des technologies les plus courantes.

4

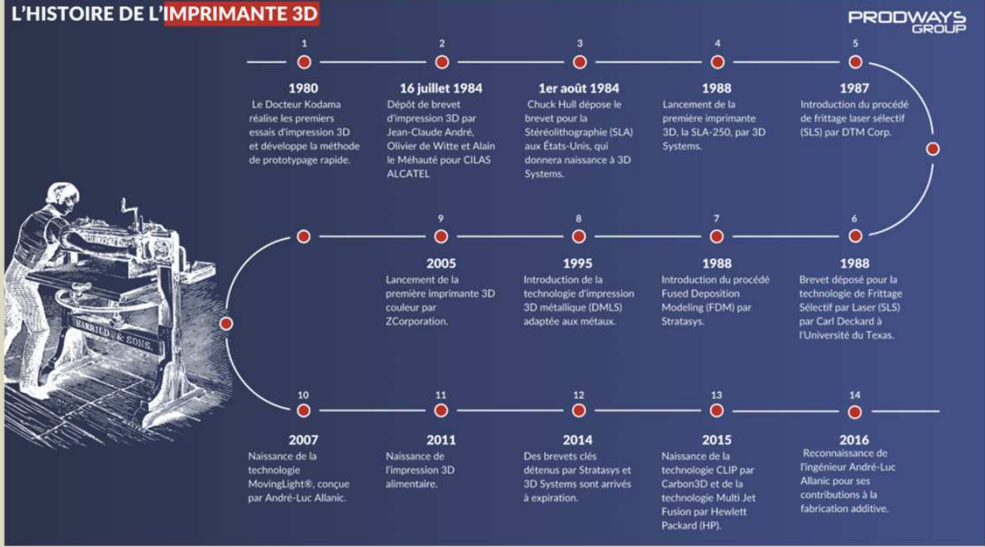


FRAMATECH

Introduction à la FA

La genèse de l'impression 3D et la FA

L'HISTOIRE DE L'IMPRIMANTE 3D



1980 Le Docteur Kodama réalise les premiers essais d'impression 3D et développe la méthode de prototypage rapide.

16 juillet 1984 Dépôt de brevet d'impression 3D par Jean-Claude André, Olivier de Witte et Alain le Méhauté pour CILAS ALCATEL.

1er août 1984 Chuck Hull dépose le brevet pour la Stéréolithographie (SLA) aux États-Unis, qui donnera naissance à 3D Systems.

1988 Lancement de la première imprimante 3D, la SLA-250, par 3D Systems.

1987 Introduction du procédé de frittage laser sélectif (SLS) par DTM Corp.

1988 Introduction de la technologie d'impression 3D métallique (DMLS) adaptée aux métaux.

1988 Introduction du procédé Fused Deposition Modeling (FDM) par Stratasys.

1988 Brevet déposé pour la technologie de Frittage Sélectif par Laser (SLS) par Carl Deckard à l'Université du Texas.

2005 Lancement de la première imprimante 3D couleur par ZCorporation.


2007 Naissance de la technologie MovingLight®, conçue par André-Luc Allanic.

2011 Naissance de l'impression 3D alimentaire.

2014 Des brevets clés détenus par Stratasys et 3D Systems sont arrivés à expiration.


2015 Naissance de la technologie CLIP par Carbon3D et de la technologie Multi Jet Fusion par Hewlett Packard (HP).

2016 Reconnaissance de l'ingénieur André-Luc Allanic pour ses contributions à la fabrication additive.



Pour gagner, faites donc jouer Framatech !

5



FRAMATECH

Introduction à la FA

Etat de l'art de l'innovation

La fabrication additive ou impression 3D, est une technologie en pleine expansion qui permet de créer des objets en trois dimensions à partir d'un modèle numérique.


Il existe différentes méthodes de fabrication, chacune adaptées à des besoins spécifiques.

Les avancées en termes de matériaux sont cruciales pour le développement de la FA.

Application : La FA a connu une adoption rapide dans de nombreux secteurs, avec des cas d'usage variés.

Avantage et limites

Défis et Perspectives



Pour gagner, faites donc jouer Framatech !

6



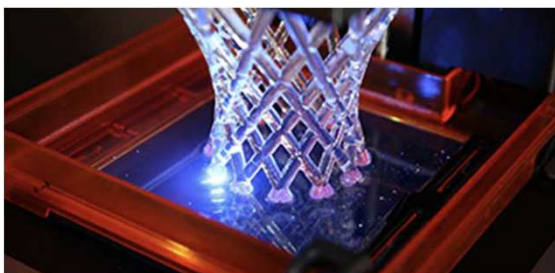
Introduction à la FA

Les différents procédés FA
(SLA, FDM, SLS, SLM, EBM, MJF, MJB)
autre...



SLA (stereolithograph apparatus) :

- procédé à l'origine de l'impression 3D _1984
- principe de photopolymérisation
- surface d'impression parmi les plus qualitatives
- impression de résines liquides
- volume de production limité
- Besoin de support pour tenir les parties qui s'élancent dans le vide.
- Post traitement : nettoyage à l'aide d'un solvant , retrait des supports et passage au four UV pour finaliser le processus de photo-polymérisation



7



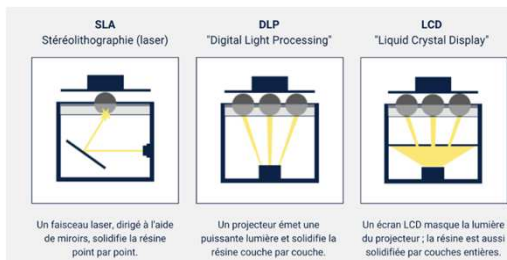
Introduction à la FA

Les différents procédés FA
(SLA, FDM, SLS, SLM, EBM, MJF, MJB)
autre...



Plusieurs entreprises ont utilisé le procédé SLA pour développer leurs propres technologies :

- SLA : Stéréolithographie, FormLab
- DLP : Digital Light Processing, EnvisionTEC,
- LCD : Liquid Crystal Display, Photocentric
- MovingLight : Prodways
- CLIP : Continuous Liquid Interface Production, Carbon3D



Applications

Tous les domaines de l'industrie grâce à sa rapidité et sa précision.
Plus particulièrement le domaine de la bijouterie et du dentaire.

8



FRAMATECH

Avantages :

- Haute précision et excellente résolution
- Finitions de surface lisses
- Production de géométries complexes
- Matériaux spécialisés
- Idéal pour les petites pièces détaillées

Introduction à la FA

Les différents procédés FA
(SLA, FDM, SLS, SLM, EBM, MJF, MJB)
autre...




Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !



Inconvénients :

- Coût élevé
- Post-traitement obligatoire
- Certaines résines présentent des sensibilités aux UV et à la lumière
- Odeur et manipulation des résines
- Durée de vie limitée des matériaux
- Limitations en taille de pièce
- Nécessité de supports d'impression

9




FRAMATECH

FDM (Fused Deposition Modeling) :

- méthode la plus répandue
- grand public et industrielles
- dépose de couches successives de matière fondue (souvent du plastique comme le PLA ou l'ABS) à travers une buse.

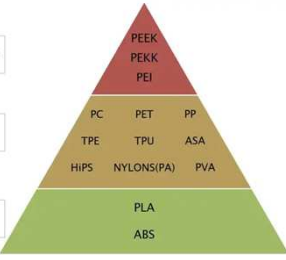
Introduction à la FA

Les différents procédés FA
(SLA, FDM, SLS, SLM, EBM, MJF, MJB)
autre...

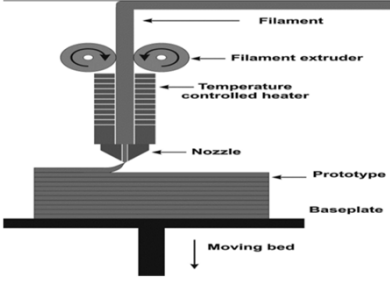


Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !

Advanced Plastics
Mechanical, thermal and chemical high strength application



Engineering Plastics
Structural purpose applications



10



Introduction à la FA

Les différents procédés FA
(SLA, FDM, SLS, SLM, EBM, MJF, MJB)
autre...



Avantages :

- Coût abordable
- Facilité d'utilisation
- Large gamme de matériaux
- Adaptabilité pour les grandes pièces
- Évolution continue de la technologie



Inconvénients :

- Résolution et qualité de surface limitée : résultat esthétique pas très agréable
- Propriétés mécaniques non isotropes
- Vitesse d'impression relativement lente
- Nécessite des supports d'impression

11



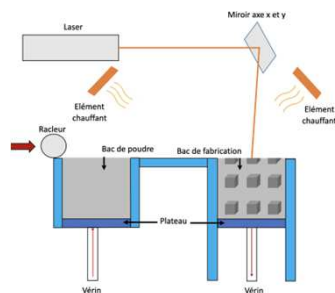
Introduction à la FA

Les différents procédés FA
(SLA, FDM, SLS, SLM, EBM, MJF, MJB)
autre...



SLS (Selective Laser Sintering) ou Frittage Sélectif par Laser

Utilise un laser comme source d'énergie thermique pour agglomérer des particules. Les particules, lorsqu'elles sont chauffées, fusionnent ensemble sans fondre. Moyen particulièrement adapté pour les prototypes fonctionnels, technologie de choix dans plusieurs industries.



12



Introduction à la FA
 Les différents procédés FA
 (SLA, FDM, SLS, SLM, EBM, MJF, MJB)
 autre...



Avantages :

- Absence de structures de support
- Grande liberté de conception, géométries très complexes, formes imbriquées
- Excellente résistance mécanique, équivalentes à celles obtenues par moulage par injection pour certains polymères.
- Choix de matériaux Nylon (PA12), TPU
- Recyclabilité de la poudre non frittée
- idéale pour la production de petites et moyennes séries : pas de moule

Inconvénients :

- Coût élevé des machines et des matériaux
- Surfaces relativement rugueuses
- Post-traitement complexe
- Taille des pièces limitées
- Gestion des poudres _ Humidité, sécurité, Recyclage...
- Précision inférieure au SLA
- Retrait des pièces et déformations



13



Introduction à la FA
 Les différents procédés FA
 (SLA, FDM, SLS, SLM, EBM, MJF, MJB)
 autre...



MJF (Multi Jet Fusion) _ MJB (Multi Jet Bonding)

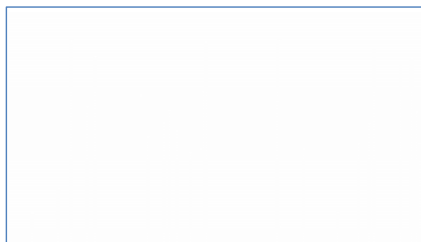
La principale différence entre le **MJB** et le **MJF** réside dans leur processus de production et les propriétés des pièces qu'ils génèrent. Le MJB utilise un liant pour lier les particules de poudre, tandis que le MJF utilise un agent de fusion et une chaleur pour créer des pièces robustes.

MJF

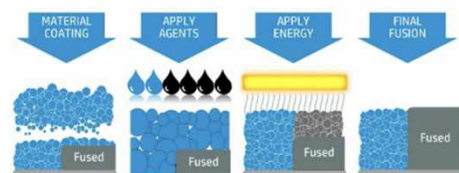
Des têtes d'impression (buses) projettent un agent de fusion et un agent de détail sur une couche de poudre polymère. Puis, un élément chauffant fusionne sélectivement la poudre où l'agent de fusion a été appliqué, créant ainsi des couches successives de pièces.

Une fois la couche terminée, une nouvelle couche de poudre est étalée et le processus se répète.

Le Nylon (PA12) est principalement utilisé, cette technologie permet aussi d'imprimer en couleur.



MULTI JET FUSION PROCESS:



14

 **FRAMATECH**

Introduction à la FA
Les différents procédés FA
(SLA, FDM, SLS, SLM, EBM, **MJF**, **MJB**)
autre...


*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*

15

 **FRAMATECH**

Introduction à la FA
Les différents procédés FA
(SLA, FDM, SLS, SLM, EBM, **MJF**, **MJB**)
autre...

Avantages :

- Rapidité de production
- Qualité des pièces
- Absence de structures de support
- Grande liberté de conception, géométries très complexes, formes imbriquées
- Excellente résistance mécanique, équivalentes à celles obtenues par moulage par injection pour certains polymères.
- Choix de matériaux Nylon (PA12), TPU
- Recyclabilité de la poudre non polymérisée
- idéale pour la production de petites séries : pas de moule

Inconvénients :

- Coût élevé des machines et des matériaux
- Post-traitement complexe : nettoyage, le sablage, le polissage,
- Limitation des Matériaux disponibles
- Taille des pièces limitées
- Gestion des poudres _ Humidité, sécurité, Recyclage...
- Sensibilité aux déformations pendant le refroidissement




*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*

16



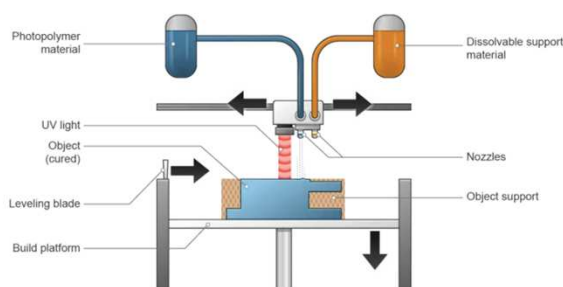
Introduction à la FA

Les différents procédés FA
(SLA, FDM, SLS, SLM, EBM, MJF, MJB)
autres...



PolyJet

Utilise des têtes d'impression à jet pour déposer des gouttelettes de résine liquide photopolymère sur une plateforme. Ces gouttelettes sont ensuite durcies par exposition à une source de lumière UV, créant des couches solides de matériau.



17



Introduction à la FA

Les différents procédés FA
(SLA, FDM, SLS, SLM, EBM, MJF, MJB)
autres...



Avantages :

- Bonne précision et résolution
- Rapidité de Production
- Finitions de surface lisses
- Production de géométries complexes
- Multi-Matériaux
- Idéal pour les petites pièces détaillées
- Utilisation de Supports Solubles → **Post-traitement** : Après l'impression, les pièces peuvent nécessiter un nettoyage et un post-traitement pour éliminer les supports ou atteindre la finition souhaitée.

Inconvénients :

- Coût élevé des matières
- Durabilité des Pièces : forte sensibilité aux UV et à la lumière
- Durée de vie limitée des matériaux
- Limitations en taille de pièce



18



Introduction à la FA
 Les différents procédés FA
 (SLA, FDM, SLS, **SLM**, EBM, MJF, MJB)
 autre...



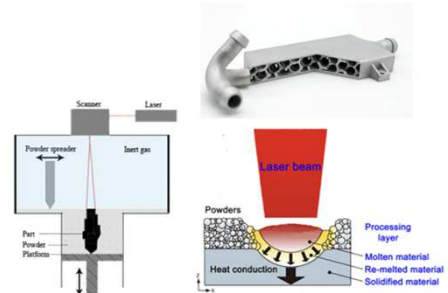
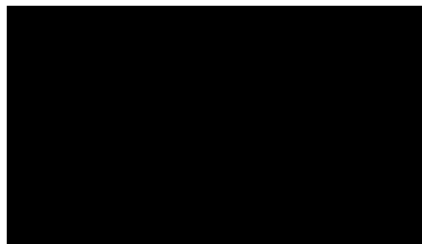
SLM (Selective Laser Melting) ou DMLS (Direct Metal Laser Sintering)

Le SLM fond complètement le matériau à l'aide d'un faisceau laser.

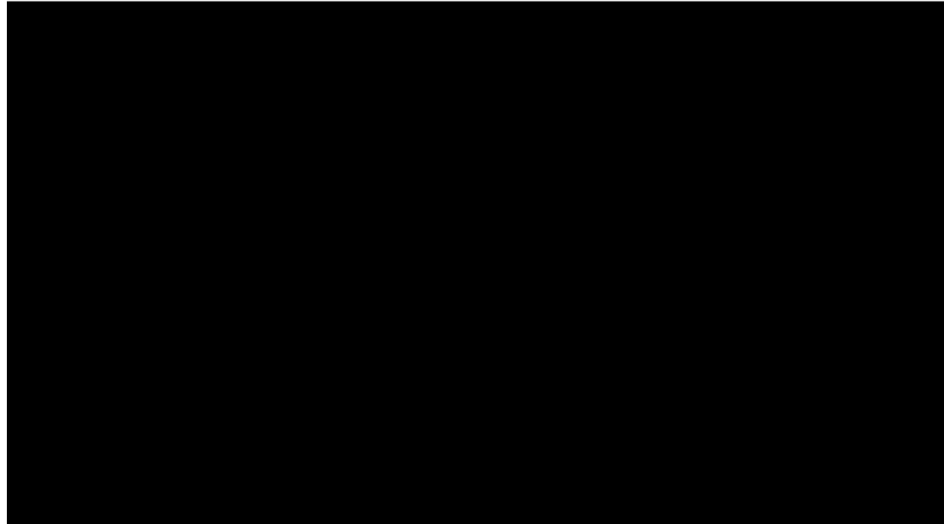
Famille LPBF (Laser Powder Bed Fusion) avec DMLS, où les particules sont frittées (partiellement fondues) plutôt que complètement fondues.

Atmosphère contrôlée avec gaz inerte (argon ou azote) pour éviter l'oxydation

Le SLM est très populaire dans des secteurs tels que l'aéronautique, l'automobile et le médical pour produire des pièces métalliques complexes.



Introduction à la FA
 Les différents procédés FA
 (SLA, FDM, SLS, **SLM**, EBM, MJF, MJB)
 autre...



FRAMATECH

Introduction à la FA
 Les différents procédés FA
 (SLA, FDM, SLS, SLM, EBM, MJF, MJB)
 autre...



Avantages :

- Production de pièces métalliques fonctionnelles _ petites séries ou pièce unique
- Grande liberté de conception, structures lattices, des canaux internes pour les systèmes de refroidissement ou des pièces imbriquées.
- Optimiser les pièces en termes de légèreté, d'efficacité thermique ou de résistance
- Densité proche de 100%, sans porosité notable.
- Grande variété de métaux et alliages métalliques : acier inoxydable, aluminium, titane, cobalt-chrome et même des alliages de nickel comme l'Inconel.
- Réduction des déchets
- Fabrication de réduction des délais de production
- Résistance à la chaleur et aux conditions extrêmes



Inconvénients :

- Coût élevé des machines et des matériaux
- Nécessite des supports d'impression
- Processus d'impression long
- Post-traitement complexe : nettoyage, le sablage, le polissage, ou le traitement thermique pour réduire les contraintes internes et améliorer les propriétés mécaniques.
- Propriétés mécaniques inégales, sensibles aux **défauts de fabrication**, tels que des porosités résiduelles ou des variations dimensionnelles.
- Taille des pièces limitées
- Gestion des poudres _ Humidité, sécurité, Recyclage...
- Sensibilité aux déformations

21

FRAMATECH

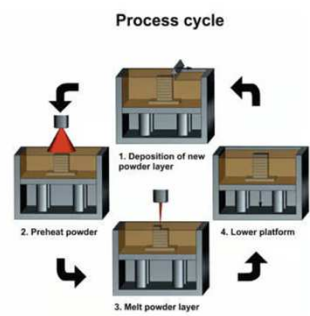
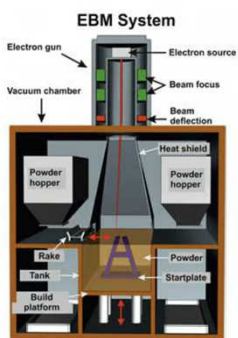
Introduction à la FA
 Les différents procédés FA
 (SLA, FDM, SLS, SLM, EBM, MJF, MJB)
 autres...




EBM (Electron Beam Melting)

Utilise un faisceau d'électrons pour fondre des poudres métalliques sous vide (afin d'éviter l'oxydation et les contaminations indésirables).


Commercialisé par la société suédoise Arcam en 2002 (rachetée par GE Additive en 2016)




22

 **FRAMATECH**

Introduction à la FA
Les différents procédés FA
(SLA, FDM, SLS, SLM, **EBM**, MJF, MJB)
autres...


*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*



23

 **FRAMATECH**

Introduction à la FA
Les différents procédés FA
(SLA, FDM, SLS, SLM, **EBM**, MJF, MJB)
autres...


*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*

Avantages :

- Utilisation de matériaux comme le titane, le cobalt-chrome et d'autres alliages haute performance.
- Vitesse de production : le faisceau d'électrons peut couvrir une grande surface en même temps
- Température du lit de poudre est élevée, ce qui réduit les contraintes internes
- Taille des pièces (max diam 350 mm pour une hauteur de 380 mm)
- Moins de déformations des pièces car il y a un préchauffage de la poudre avant sa fusion
- Recyclage des poudres

Inconvénients :

- Précision correcte (généralement moins bonne que le SLM)
- Coût élevé de l'installation et des matières
- Surface rugueuse
- Nécessite des supports d'impression
- Peut être nécessaire de passer les pièces dans un four pendant plusieurs heures pour libérer les contraintes induites par le processus de fabrication.



24



Introduction à la FA
 Les différents procédés FA
 (SLA, FDM, SLS, SLM, EBM, MJF, MJB)
 autres...



Choix entre SLM et EBM :

- **SLM** est préférable pour les applications où la précision et la qualité de surface sont cruciales, comme dans le domaine **aérospatial** et **dentaire**.
- **EBM** est souvent utilisé pour la production de **pièces plus grandes** et complexes.

La technologie Electron Beam Melting permettra de créer des pièces plus rapidement que la technologie LPBF (SLM et DMLS), mais le procédé est moins précis et la finition sera de moindre qualité car la poudre est plus granuleuse.

25

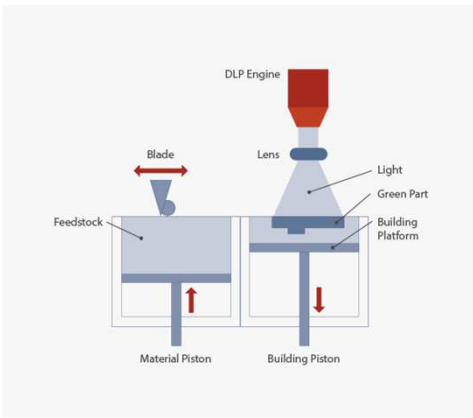


Introduction à la FA
 Les différents procédés FA
 (SLA, FDM, SLS, SLM, EBM, MJF, MJB)
 autres...




LMM Technology (Lithography-based Metal Manufacturing)


Principe de la stéréolithographie et utilise la photopolymérisation pour construire des pièces en suivant un processus couche par couche via une exposition à la lumière. Par rapport aux procédés de stéréolithographie conventionnels, la matière première (feedstock) se compose de particules métalliques dispersées dans une phase de liant organique.




26

 **FRAMATECH**

Introduction à la FA
Les différents procédés FA
(SLA, FDM, SLS, SLM, EBM, MJF, MJB)
autres...


*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*



27

 **FRAMATECH**

Introduction à la FA
Les différents procédés FA
(SLA, FDM, SLS, SLM, EBM, MJF, MJB)
autres...


*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*

Avantages :

- Rapidité de production
- Détails très fins et des tolérances serrées
- Absence de structures de support
- Choix de matériaux très large
- Recyclage du feedstock non polymérisée
- Réduction des contraintes thermiques pendant la construction

Inconvénients :

- Coût élevé de l'installation et des matières
- Etape de déliantage et de frittage : temps de process, risque de déformation
- Taille des pièces limités
- Contrôle rigoureux des paramètres de production
- Sensible aux conditions environnementales (température, humidité),



28



Introduction à la FA
 Les différents procédés FA
 (SLA, FDM, SLS, SLM, EBM, MJF, MJB)
 autres...



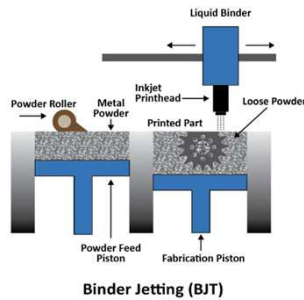
Binder Jetting

Utilise un procédé d'agglomération par jet de liant.

Étalement d'une fine couche de matériau en poudre (métal, céramique, sable) sur une plateforme de construction

Application du Liant : Une tête d'impression à jet projette un liant liquide sur la couche de poudre.

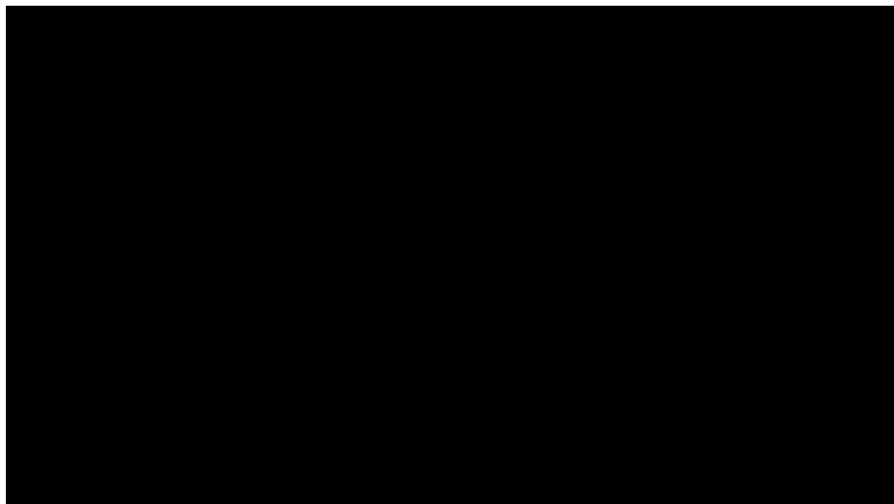
La pièce peut nécessiter un frittage pour les matériaux métalliques, pour solidifier les particules et renforcer la pièce finale.



29



Introduction à la FA
 Les différents procédés FA
 (SLA, FDM, SLS, SLM, EBM, MJF, MJB)
 autres...



30

FRAMATECH

Introduction à la FA
Les différents procédés FA
(SLA, FDM, SLS, SLM, EBM, MJF, MJB)
autres...

*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*

Avantages :

- Production rapide et haute productivité
- Large surface d'impression
- Absence de structures de support
- Possibilité de recycler la poudre non utilisée
- Moins de distorsion thermique
- Coût réduit
- Grande capacité de production

Inconvénients :

- Résistance des pièces vertes
- Porosité
- Durée des cycles de fabrication
- Etape de déliantage et de frittage : temps de process, risque de déformation
- Sensibilité aux conditions environnementales
- Coût des équipements de post-traitement
- Limitations pour des pièces de haute performance



31


FRAMATECH

Introduction à la FA

*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*

Etat des lieux des machines (prix, volumes de production, matériaux,...)

32



FRAMATECH

Introduction à la FA

Etat des lieux des machines (prix, volumes de production, matériaux,...)

Imprimante polymère résine : SLA, DLP, LCD...

Marché plutôt professionnel dans les années 2000 avec des marques comme EnvisionTec, Prodways, 3Dsystems (plus de 100 K€)


Le marché s'est démocratisé avec beaucoup de nouvelles marques low cost : Anycubic, Elegoo, Formlab (semi-pro), Creality...

Prix des imprimantes :
 Les premiers prix : 300€
 Jusque plusieurs dizaines de milliers d'Euros pour les versions professionnelles
 Dimension type : 200x140x160 (pour information...)

Matériaux (résines) entre 50 € et 500 €/L,


Quelques exemples pour information :

| MARQUE | PRODUIT | TAILLE D'IMPRESSION | PAYS | RIX € |
|-----------|------------|---------------------|---------------|----------|
| Peopoly ✓ | Phenom L | 345 × 194 × 400 mm | Chine | 2 799 € |
| Peopoly ✓ | Phenom XXL | 527 × 296 × 550 mm | Chine | 6 999 € |
| Formlabs | Form 3L | 336 × 200 × 300 mm | United States | 12 000 € |



Pour gagner, faites donc jouer Framatech !

33



FRAMATECH

Introduction à la FA

Etat des lieux des machines (prix, volumes de production, matériaux,...)

Imprimantes polymère _ résine: SLA, DLP, LCD...

Matière : résines spécifiquement conçues pour réagir à la lumière ultraviolette (UV)

Résines résistantes (Tough/Engineering Resins) : résistance aux chocs et une bonne durabilité.
Applications : Prototypes fonctionnels, outils, boîtiers


Résines rigides : Contiennent souvent des charges de verre pour augmenter la rigidité et la résistance aux déformations.
Applications : Pièces nécessitant une haute stabilité dimensionnelle sous contrainte mécanique.

Résines élastomères : Simulent les propriétés des matériaux souples comme le caoutchouc ou le silicone.
Applications : Pièces nécessitant de la flexibilité, comme des joints, des coques, ou des composants amortissants.

Résines haute température : Résistent à des températures élevées, généralement jusqu'à environ 200-300°C.
Applications : Moules pour thermoformage, pièces pour tests en conditions thermiques élevées.


Résines biocompatibles : Ces résines sont spécialement formulées pour des applications médicales et dentaires. Elles sont souvent certifiées pour le contact avec la peau ou même l'implantation temporaire dans le corps humain.
Applications : Prothèses dentaires, guides chirurgicaux, implants temporaires, appareils auditifs.

Résines coulables (Castable Resins) : Ces résines sont spécialement conçues pour brûler proprement lors de la fonte à la cire perdue, sans laisser de résidus.
Applications : Principalement utilisées pour la joaillerie, le dentaire, et les petites pièces métalliques, où elles servent de moules pour la coulée de métal.



Pour gagner, faites donc jouer Framatech !

34



FRAMATECH

Introduction à la FA

Etat des lieux des machines (prix, volumes de production, matériaux,...)

Imprimantes polymère _ filament : FDM


Gamme de prix extrêmement variable en fonction de plusieurs paramètres (taille, précision, vitesse d'impression) et de leur niveau d'utilisation.

FDM de bureau (usage personnel) : Peut permettre de faire des prototypes simples
de 150 € à 1 500 € (pour information)

FDM professionnelles : production de prototypes ou des pièces fonctionnelles de haute qualité. Elles offrent une plus grande précision, une meilleure gestion des matériaux et des capacités d'impression avancées (double extrusion, contrôle de la température, etc.).
de 1 500 € à 10 000 € (pour information)


FDM industrielles : production de série, les pièces de grande taille et utilisation de matériaux avancés comme les composites renforcés de fibre de carbone, PEEK, ou ULTEM. Elles sont utilisées dans des industries telles que l'aérospatiale, l'automobile, le médical...
De 10 000 € à 500 000 € (pour information)

Matériaux (filament) entre 20 € et 300 €/Kg



Pour gagner, faites donc jouer Framatech !

35



FRAMATECH

Introduction à la FA

Etat des lieux des machines (prix, volumes de production, matériaux,...)

Imprimantes polymère _ filament : FDM

Matière : principalement des **filaments thermoplastique**

PLA (Acide Polylactique) : Facile à imprimer, peu de déformations (warping), faible température d'impression (~180-220°C). Biodégradable (fabriqué à partir de ressources renouvelables comme le maïs).
Applications : Prototypes, objets décoratifs, pièces non fonctionnelles.

ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrene) : Résistant et plus solide que le PLA, avec une meilleure tolérance à la chaleur (~230-260°C).
Applications : Pièces fonctionnelles, boîtiers, jouets, prototypes résistants

PETG (Polyéthylène Téréphtalate Glycolisé) : Combine la facilité d'impression du PLA avec la résistance mécanique et chimique de l'ABS. Bonne résistance à l'humidité et aux produits chimiques, ainsi qu'à la chaleur (~220-250°C). Flexible, durable, et résistant aux chocs.
Applications : Pièces fonctionnelles, contenants alimentaires, pièces exposées à l'humidité ou aux produits chimiques.


Nylon (Polyamide) : Très résistant, flexible, et durable, avec une excellente résistance à l'usure et aux chocs. Bonne résistance aux hautes températures (~240-260°C) et à l'abrasion.
Applications : Engrenages, pièces mécaniques, charnières, pièces fonctionnelles nécessitant de la solidité et de la durabilité.

TPU (Polyuréthane Thermoplastique) : Matériau flexible et élastique, souvent utilisé pour des pièces souples.
Applications : Joints, coques de protection, semelles de chaussures, pièces nécessitant de la flexibilité.

PC (Polycarbonate) : Très solide, résistant à la chaleur (~250-300°C), et transparent.
Applications : Pièces mécaniques, objets soumis à des contraintes thermiques élevées, composants techniques.

PVA (Alcool Polyvinylique) : Matériau soluble dans l'eau utilisé comme **matériau de support**.
Applications : Supports pour des géométries complexes ou des pièces creuses

Carbone renforcé (Carbon Fiber Composites) : Matériau composite combiné à des filaments comme le PLA, ABS, ou nylon, renforcé avec des fibres de carbone.
Applications : Pièces structurelles nécessitant une grande rigidité et une faible densité, drones, pièces automobiles.



Pour gagner, faites donc jouer Framatech !

36



Introduction à la FA
Etat des lieux des machines (prix, volumes de production, matériaux,...)



| Matériau | Caractéristiques | Applications | Limites |
|--|--|--|---|
| PLA (Acide Polylactique) | - Facile à imprimer, faible déformation - Température d'impression : 180-220°C - Biodégradable | - Prototypes, objets décoratifs - Pièces non fonctionnelles | - Faible résistance thermique - Moins solide que d'autres |
| ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrene) | - Résistant aux chocs, durable - Température d'impression : 230-260°C | - Pièces fonctionnelles - Boîtiers, jouets, prototypes résistants | - Warping, nécessite un lit chauffant et une enceinte fermée |
| PETG (Polyéthylène Téréphthalate Glycolisé) | - Bonne résistance mécanique, chimique et thermique - Température d'impression : 220-250°C | - Pièces fonctionnelles - Contenants alimentaires, pièces exposées à l'humidité | - Moins rigide que l'ABS |
| Nylon (Polyamide) | - Flexible, résistant à l'usure et aux chocs - Température d'impression : 240-260°C | - Engrenages, charnières - Pièces mécaniques fonctionnelles | - Absorbe l'humidité, nécessite un stockage sec |
| TPU (Polyuréthane Thermoplastique) | - Flexible, résistant aux chocs et à l'usure | - Joints, coques de protection - Pièces souples | - Plus difficile à imprimer, nécessite des réglages spécifiques |
| PC (Polycarbonate) | - Très résistant, supporte des températures élevées (~250-300°C) - Résistant aux chocs | - Pièces mécaniques - Composants soumis à des contraintes thermiques | - Difficile à imprimer, nécessite des températures élevées |
| PVA (Alcool Polyvinylique) | - Soluble dans l'eau - Utilisé comme matériau de support pour double extrusion | - Supports pour pièces complexes | - Absorbe l'humidité, nécessite un stockage sec |
| Carbone renforcé (Composite) | - Renforcé avec des fibres de carbone - Rigide, léger, résistant | - Pièces structurelles - Drones, pièces automobiles | - Abrasif pour les buses, nécessite des buses renforcées |

37



Introduction à la FA
Etat des lieux des machines (prix, volumes de production, matériaux,...)



Imprimantes polymère _ Poudre : SLS

Généralement plus coûteuses que d'autres types d'imprimantes 3D (comme FDM ou SLA) en raison de leur complexité technologique.

Plutôt destinées aux secteurs professionnels.

Imprimante de « bureau » (prix pour information) :

Sinterit Lisa Pro : Environ 12 000 € à 15 000 €,
Formlabs Fuse 1 : Environ 15 000 € à 25 000 €

SLS professionnelles (prix pour information) :

3D Systems ProX SLS 6100 : Environ 100 000 € à 150 000 €,
EOS Formiga P 110 Velocis : Environ 70 000 € à 100 000 €,

SLS industrielles (prix pour information) :

EOS P 396 : Environ 250 000 € à 500 000 €
3D Systems sPro 230 : Prix supérieur à 500 000 €

Matériaux : Les poudres de nylon (PA 11, PA 12), TPU et autres matériaux SLS coûtent entre 50 € et 150 €/kg

38



FRAMATECH

Introduction à la FA

Etat des lieux des machines (prix, volumes de production, matériaux,...)

Imprimantes polymère _ Poudre : SLS

Matière : poudres polymères qui seront frittées (soudées partiellement)

Nylon (Polyamide - PA) : Matériau le plus couramment utilisé en SLS. Peut être renforcé avec de la fibre de verre ou de la fibre de carbone
PA 11 : Plus flexible et résistant aux chocs, dérivé de matières végétales.
PA 12 : Plus rigide, bonne résistance chimique et à l'humidité.
Applications : Pièces fonctionnelles, prototypes, composants mécaniques, boîtiers, charnières, pièces complexes, pièces structurelles, drones, pièces automobiles, équipements sportifs.

TPU (Thermoplastic Polyurethane) : Matériau flexible et élastique avec une grande résistance à l'usure, aux chocs et aux produits chimiques.
Applications : Joints, semelles de chaussures, pièces amortissantes, coques de protection.

Polystyrène (PS) : Utilisé principalement pour des moules perdus (prototypes en fonderie).
Applications : Modèles de fonderie, moules pour la coulée de métal (fonderie à la cire perdue).


Alumide (Nylon mélangé avec de la poudre d'aluminium) : Mélange de nylon avec de la poudre d'aluminium, donnant un aspect métallique et une rigidité accrue.
Applications : Pièces rigides, résistantes à la chaleur, pièces techniques, pièces décoratives avec aspect métallique.

PP (Polypropylène) : Haute résistance chimique, flexibilité et résistance à la fatigue.
Applications : Pièces avec charnières flexibles, réservoirs de fluides, composants d'automobile.



*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*

39



FRAMATECH

Introduction à la FA

Etat des lieux des machines (prix, volumes de production, matériaux,...)


Imprimantes polymère _ Poudre, Encre et agents de fusion : MJF M

Applications industrielles souvent utilisées pour produire des pièces fonctionnelles à grande échelle.

MJF professionnelles :
prototypes et petites séries.
HP Jet Fusion 3200 : Environ 100 000 € à 200 000 €. (prix pour information)

MJF industrielles :
production de grande échelle, cette imprimante est optimisée pour des pièces de haute qualité avec un coût par pièce réduit, idéale pour les grandes entreprises.
HP Jet Fusion 580 : Environ 700 000 € à 1 000 000 €. (prix pour information)

Matériaux : 40 € et 200 €/kg (prix pour information)



*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*

40



FRAMATECH

Introduction à la FA

Etat des lieux des machines (prix, volumes de production, matériaux,...)

Imprimantes polymère _ Poudre, Encre et agents de fusion : MJF^M

Principalement compatible avec des poudres thermoplastiques

Nylon (Polyamide - PA) :

PA 12 (Nylon 12) : Bonne résistance mécanique, flexibilité, et durabilité. Résistant aux produits chimiques et à l'humidité.

Applications : Pièces fonctionnelles, prototypes, pièces automobiles, composants d'assemblage.

PA 11 (Nylon 11) : Meilleure résistance aux impacts et à la température par rapport au PA 12, plus respectueux de l'environnement car dérivé de sources renouvelables

Applications : Applications industrielles, pièces soumises à des contraintes mécaniques élevées.

Polypropylène (PP) :

Propriétés : Léger, résistant à l'humidité et aux produits chimiques, bonne résistance à la fatigue et à l'impact.

Applications : Prototypes, pièces de conditionnement, éléments d'assemblage

Polycarbonate (PC) :

Propriétés : Très résistant aux chocs, bonne résistance à la chaleur et à la transparence.

Applications : Composants électroniques, pièces mécaniques soumises à des contraintes thermiques.

Polystyrène (PS) :

Propriétés : Bonnes propriétés d'impression, rigide et léger.

Applications : Prototypes, modèles, pièces nécessitant une finition de surface lisse.



*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*

41



FRAMATECH

Introduction à la FA

Etat des lieux des machines (prix, volumes de production, matériaux,...)

Imprimantes métal : SLM

Le prix varie considérablement en fonction de la taille de la chambre et de la complexité de l'imprimante. Cette technologie est essentiellement utilisée à des fins industrielles.

SLM professionnelles :

Destinées aux petites et moyennes entreprises qui nécessitent une qualité d'impression élevée et la capacité de travailler avec des métaux pour produire des prototypes ou des pièces fonctionnelles.

De 100 000€ à 500 000€

One Click Metal : Environ de 100 000€ à 250 000€ (prix pour information)

3D Systems ProX DMP 320 : Environ 200 000 € à 400 000 € (prix pour information)

SLM industrielles :

Machines haut de gamme, conçues pour la production en série et pour les applications exigeantes, notamment dans les secteurs de l'aérospatial, de l'automobile et médical.

De 500 000 € à plus de 1 000 000€

EOS M 400 : Environ 500 000 € à 1 000 000 € (prix pour information)

SLM Solutions SLM 500 : Environ 700 000 € à 1 000 000 € (prix pour information)

Matière : poudre entre 100 € et 500 €/kg, selon le type et la qualité du matériau

Nécessite des équipements de post-traitement important : four, pour le retrait de la poudre non fondue, environnement...



*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*

42



FRAMATECH

Introduction à la FA

Etat des lieux des machines (prix, volumes de production, matériaux,...)

Imprimantes métal : EBM

Principalement destinées à des applications industrielles et sont souvent utilisées dans des secteurs tels que l'aérospatiale, l'automobile et la médecine.

EBM professionnelles : un seul fabricant, Arcam

de 300 000 € à 700 000 € (pour information)

EBM industrielles : machine avancée conçue pour les productions à grande échelle

de 700 000 € à 1 500 000 € (pour information)


Matière : poudre entre 200 € et 600 €/kg, selon le type et la qualité du matériau

Nécessite des équipements de post-traitement important : four, pour le retrait de la poudre non fondue, environnement...



Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !

43



FRAMATECH

Introduction à la FA

Etat des lieux des machines (prix, volumes de production, matériaux,...)

Imprimantes métal : LLM

Imprimantes fabriquées par Incus.


De 250 000€ à 500 000€ (pour information)


Entreprise relativement jeune.

2 modèles d'imprimantes actuellement proposées

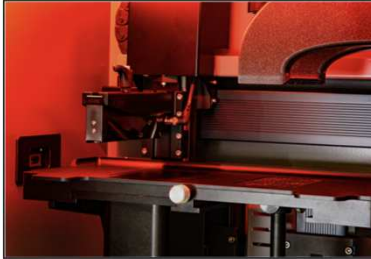
Matière : prix non communicable.

Une très grande variété de poudre métallique peut être imprimé avec cette solution.






Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !



| Hammer Lab35 Parameters | |
|------------------------------|------------------------------|
| Lateral resolution | 35 µm |
| Building volume (x, y, z) | 56 x 89.6 x 120 mm |
| Layer thickness | 10 – 100 µm |
| Projector type | one static projector |
| Material throughput | up to 100 cm ³ /h |
| Feedstock reloading | manual |
| Printer dimensions (w, d, h) | 80 x 70 x 110 cm |

44



FRAMATECH

Introduction à la FA

Etat des lieux des machines (prix, volumes de production, matériaux,...)


Imprimantes métal : Binder Jetting

Binder Jetting de bureau et professionnelles : petites entreprises ou les laboratoires qui souhaitent explorer la technologie.
de 50 000 € à 250 000 € (pour information)
ExOne Innovent+ : Environ 50 000 € à 100 000 €.

Binder Jetting industrielles : applications industrielles avancées nécessitant une production à grande échelle.
de 250 000 € à 1 000 000 €
Desktop Metal Shop System : Environ 500 000 € à 1 000 000 €.
ExOne X1 25Pro : Environ 250 000 € à 500 000 €.

les poudres peuvent coûter entre **50 € et 300 €/kg**

Nécessite des équipements de post-traitement important : four (cuisson ou la fusion), retrait de la poudre non fondue, environnement...



*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*

45



FRAMATECH

Introduction à la FA

Etat des lieux des machines (prix, volumes de production, matériaux,...)

Les matières dans le métal :

Acier Inoxydable 316L et 17-4 PH
Propriétés : Bonne résistance à la corrosion, excellent pour des applications structurelles.
Applications : Composants industriels, pièces d'outillage, prototypes fonctionnels.

Titane Ti6Al4V (Ti-64)
Propriétés : Léger, haute résistance, excellente biocompatibilité.
Applications : Aéronautique, implants médicaux, pièces de moteurs.

Aluminium AlSi10Mg
Propriétés : Léger, bonne conductivité thermique et électrique, facilité d'usinage.
Applications : Pièces automobiles, structures légères, prototypes fonctionnels.

Nickel et Alliages de Nickel
Exemples : Inconel 625, Inconel 718
Propriétés : Excellente résistance à la chaleur et à la corrosion.
Applications : Composants d'avions, turbines à gaz, applications haute température.

Cobalt-Chrome
Propriétés : Haute résistance à l'usure et à la corrosion, bonne résistance aux températures élevées.
Applications : Implants médicaux, composants pour l'industrie aérospatiale, pièces d'outillage.

Poudres Métalliques Spécialisées
Exemples : Poudres contenant du cuivre, de l'acier maraging, etc.
Propriétés : conçues pour des applications de niche.

Matériaux Composites
Exemples : Poudres métalliques renforcées par des fibres.
Propriétés : Amélioration de la résistance et réduction du poids.
Applications : Applications aéronautiques, pièces nécessitant une rigidité accrue.



*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*

46



Introduction à la FA
Etat des lieux des machines (prix, volumes de production, matériaux,...)



Les matières dans le métal :

| | Propriétés | Applications |
|----------------------|--|-------------------------------------|
| Acier inoxydable | Résistance à la corrosion | Composants industriels |
| Titane | Léger, haute résistance | Aéronautique, implants médicaux |
| Aluminium | Léger, bonne conductivité | Pièces automobiles |
| Nickel | Résistance à la chaleur | Composants d'aéronefs |
| Cobalt-Chrome | Résistance à l'usure | Implants médicaux |
| Poudres spécialisées | Propriétés adaptées à des applications spécifiques | Outils, pièces de haute performance |
| Matériaux composites | Résistance améliorée, poids réduit | Applications aéronautiques |

47



Introduction à la FA
Etat des lieux des machines (prix, volumes de production, matériaux,...)



316L Stainless Steel, largement utilisé pour ses excellentes propriétés de résistance à la corrosion, sa durabilité et sa faible teneur en carbone.

Composition Chimique

- **16-18% de Chrome (Cr)** : Pour la résistance à l'oxydation et à la corrosion.
- **10-14% de Nickel (Ni)** : Pour stabiliser la structure austénitique, améliorer la ductilité et la résistance à la corrosion.
- **2-3% de Molybdène (Mo)** : Pour une résistance accrue à la corrosion, notamment dans des environnements acides et salins.
- **Faible teneur en Carbone (≤ 0.03%)** : Ce qui réduit la sensibilité à la corrosion intergranulaire après soudage, et donne le suffixe "L"

- 1. Excellente Résistance à la Corrosion :**
Le 316L est particulièrement résistant à la corrosion dans des environnements marins ou chimiques, où des acides chlorhydriques, sulfuriques ou d'autres agents corrosifs sont présents. Il est aussi résistant à la piqûre (pitting) et à la corrosion par crevasse grâce au molybdène.
- 2. Faible Teneur en Carbone :**
Comparé au 316 standard, le 316L a une plus faible teneur en carbone, ce qui minimise la précipitation de carbures pendant le soudage et permet ainsi d'éviter la corrosion intergranulaire, qui peut se produire dans les aciers inoxydables riches en carbone.
- 3. Haute Ductilité et Facilité d'Usinage :**
Ce matériau est facile à souder et à usiner tout en conservant une excellente résistance et une bonne ductilité.
- 4. Bonne Résistance à des Températures Élevées :**
Le 316L peut supporter des températures élevées tout en maintenant ses propriétés mécaniques, bien qu'il ne soit pas conçu spécifiquement pour des applications à très haute température.


Applications

- L'acier inoxydable **316L** est utilisé dans des environnements exigeants en raison de sa résistance à la corrosion et de ses propriétés mécaniques. On le retrouve dans :
- **Industrie chimique et pétrochimique** : Réservoirs, tuyauterie, et équipements exposés à des agents corrosifs.
- **Secteur médical** : Implants chirurgicaux et équipements médicaux, notamment en orthopédie (implants, prothèses) en raison de sa biocompatibilité.
- **Environnements marins** : Hélices, boulons, et autres pièces d'équipement soumis à l'eau salée.
- **Alimentation et boissons** : Équipements de transformation des aliments où l'hygiène et la résistance à la corrosion sont cruciales.
- **Industrie pharmaceutique** : Réacteurs et contenants pour la fabrication de produits pharmaceutiques.

Conclusion

L'acier inoxydable **316L** est un alliage de qualité supérieure avec une résistance exceptionnelle à la corrosion, ce qui en fait un matériau idéal pour des environnements agressifs et exigeants. Grâce à sa biocompatibilité, il est également couramment utilisé dans des applications médicales, en plus des industries chimiques, marines et alimentaires.


48



FRAMATECH

Introduction à la FA

Etat des lieux des machines (prix, volumes de production, matériaux,...)



Pour gagner, faites donc jouer Framatech !

17-4 PH Stainless Steel est un acier inoxydable.

Il contient environ **17% de chrome** et **4% de nickel**, d'où son nom. Présence possible d'éléments comme le cuivre, le niobium (ou le columbium) et parfois du molybdène, ce qui lui confère ses propriétés spécifiques.


- 1. Résistance Mécanique Élevée :**
Après un traitement thermique de durcissement par précipitation, le 17-4 PH acquiert une grande résistance mécanique, souvent supérieure à celle des autres types d'acier inoxydable.
- 2. Bonne Résistance à la Corrosion :**
Grâce à sa teneur élevée en chrome et en nickel, il présente une bonne résistance à la corrosion dans des environnements industriels et marins.
- 3. Durcissement par Précipitation :**
Ce type d'acier inoxydable peut être durci par un processus appelé **durcissement par précipitation** (PH, pour *Precipitation Hardening*). Ce traitement thermique permet d'améliorer ses propriétés mécaniques sans altérer ses dimensions.
- 4. Facilité d'Usinage :**
Dans sa forme martensitique, il peut être usiné relativement facilement avant de subir le traitement de durcissement.

Applications

- Le 17-4 PH est largement utilisé dans des domaines où une combinaison de haute résistance mécanique et de bonne résistance à la corrosion est requise, comme :
- **Aérospatiale**
- **Industrie pétrolière et gazière**
- **Applications marines**
- **Implants médicaux**
- **Pièces pour équipements industriels**

En résumé, l'acier inoxydable **17-4 PH** est un alliage polyvalent qui combine résistance, durabilité et résistance à la corrosion, ce qui en fait un matériau de choix dans de nombreuses applications industrielles et techniques.


49



FRAMATECH

Introduction à la FA

Etat des lieux des machines (prix, volumes de production, matériaux,...)



Pour gagner, faites donc jouer Framatech !

Le choix entre 316L et 17-4PH dépend des **exigences spécifiques** de l'application, notamment en termes de résistance à la corrosion, de propriétés mécaniques et de conditions d'utilisation.

Le 316L est souvent préféré pour des environnements corrosifs, tandis que le 17-4PH est choisi pour sa résistance et sa durabilité dans des applications mécaniques exigeantes.

| Caractéristique | 316L | 17-4PH |
|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Type | Austénitique | Martensitique |
| Résistance à la traction | Environ 480-620 MPa | Environ 930-1 150 MPa |
| Dureté | Environ 85 HRB | Peut atteindre 40 HRC |
| Ductilité | Excellente | Moins bonne |
| Résistance à la corrosion | Très bonne | Bonne, mais généralement moins |
| Applications | Équipements médicaux, marins | Composants d'aéronefs, outillage |
| Traitement thermique | Généralement non requis | Nécessaire pour le durcissement |

50



FRAMATECH



Introduction à la FA
Etat des lieux des machines (prix, volumes de production, matériaux,...)



*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*

Le Ti64 (Ti6Al4V-9), est très utilisé dans des applications industrielles de haute performance.

Propriétés de l'alliage Ti64 :

- 1. Haute Résistance Mécanique :**
Excellente résistance spécifique : rapport résistance/poids
- 2. Excellente Résistance à la Corrosion :**
Adapté aux environnements difficiles tels que les environnements marins, chimiques ou exposés aux acides.
- 3. Légèreté :**
45% plus léger que l'acier, ce qui fait du Ti64 un choix privilégié dans les industries où la réduction de poids est cruciale comme l'aéronautique.
- 4. Bonne Biocompatibilité :**
Grâce à sa compatibilité avec les tissus humains (faible risque de rejet), il est souvent utilisé pour la fabrication des implants et des prothèses.
- 5. Résistance à Haute Température :**
Conserve ses propriétés mécaniques à des températures relativement élevées, 400-600°C, ce qui le rend adapté pour les moteurs à réaction et les turbines.

Applications du Ti64

Aérospatiale :
Industrie aéronautique et spatiale pour des pièces de structure (comme des composants de fuselage, des ailes et des trains d'atterrissage) et des moteurs (pièces de turbines, compresseurs, etc.)

Industrie Médicale :
Grâce à sa biocompatibilité, le Ti64 est utilisé pour fabriquer des implants médicaux, notamment des prothèses de hanches et de genoux, des plaques et des vis chirurgicales.

Sport et Loisirs :
Equipements sportifs de haute performance (vélos, clubs de golf, cadres de raquettes), où la légèreté et la résistance sont des atouts majeurs.

Automobile :
Dans le secteur de la compétition automobile, le Ti64 est utilisé pour la fabrication de composants légers et résistants à haute performance (soupapes, bielles, etc.).


Inconvénients général mais avantage pour la fabrication additive :

Coût Élevé : Le Ti64 est un matériau coûteux en raison de la complexité de son extraction et de sa fabrication.


Usinage Difficile : Le titane est difficile à usiner à cause de sa tendance à provoquer un fort échauffement et son faible coefficient de frottement, ce qui exige des outils spécifiques et une gestion minutieuse de la chaleur.

Conclusion
Alliage largement utilisé dans les domaines où les exigences en matière de résistance, de légèreté, et de résistance à la corrosion sont très élevées. Il est notamment privilégié dans l'aéronautique, le médical, et l'industrie automobile, malgré son coût relativement élevé.


51



FRAMATECH



Introduction à la FA
Etat des lieux des machines (prix, volumes de production, matériaux,...)



*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*

Aluminium AlSi10Mg

Avantages :

Légèreté : Avec une faible densité, AlSi10Mg est un choix privilégié pour des applications où le poids est critique.

Bonne résistance à la corrosion : L'alliage présente une résistance raisonnable à la corrosion, bien qu'il puisse nécessiter un traitement de surface dans des environnements très corrosifs.

Facilité d'usinage et de soudage : Sa bonne usinabilité et soudabilité en font un choix populaire pour les processus de fabrication.

Adapté à l'impression 3D : Cet alliage est largement utilisé dans l'impression 3D, en particulier par des techniques comme la fusion par laser (SLM)

Applications :

Industrie aérospatiale : Composants structurels légers tels que des supports, des pièces de moteur, etc.


Automobile : Pièces légères pour améliorer l'efficacité énergétique.

Équipements sportifs : Cadres de bicyclettes, pièces de matériel de ski, etc.

Prototypage rapide : Utilisé dans l'impression 3D pour produire des prototypes fonctionnels.

Conclusion :
L'aluminium **AlSi10Mg** est un alliage polyvalent, léger et résistant, adapté à de nombreuses applications industrielles et commerciales. Ses propriétés mécaniques et sa bonne résistance à la corrosion en font un choix de premier plan pour les pièces nécessitant à la fois légèreté et solidité.

52




FRAMATECH

Panorama du marché, les secteurs industriels concernés et les usages

Introduction à la FA

Panorama du marché, les secteurs industriels concernés et les usages



Pour gagner, faites donc jouer Framatech !

53



FRAMATECH

Panorama du marché, les secteurs industriels concernés et les usages

Introduction à la FA

Panorama du marché, les secteurs industriels concernés et les usages

La FA connaît une croissance rapide au cours des dernières années et continue d'évoluer à un rythme soutenu.

Cette technologie transforme le paysage industriel en permettant une fabrication plus rapide, flexible et économique dans divers secteurs.

Taille du marché et croissance :
 En 2023, la taille du marché mondial est estimée à environ **16 milliards de dollars**.
 Selon diverses prévisions, il pourrait atteindre entre **30 et 50 milliards de dollars** d'ici 2030.

La **COVID-19** a accéléré l'adoption dans certains secteurs : la fabrication d'équipements médicaux, pièces d'urgence... augmentant ainsi sa visibilité et son importance stratégique

Segmentation du marché :
Par technologie : FDM _ SLA _ SLM _ Binder Jetting _ MJF
Par matériau : Polymères (plastiques) _ Métaux _ Céramiques _ Composites
Par application : Prototypage rapide _ Pièces d'usage final _ Outils et moules _ Fabrication médicale _ Aérospatiale et défense

Acteurs principaux du marché :
Stratasys : Leader historique sur le marché des polymères
3D Systems : pionniers de l'impression 3D, actif dans les technologies SLA et SLS
HP : Forte entrée sur le marché avec des solutions industrielles compétitives (technologie MJF)
EOS : Spécialiste de la fusion laser sélective (SLM)
GE Additive : Un acteur clé dans l'impression 3D métal, principalement pour l'industrie aéronautique.
Desktop Metal : Solutions abordables d'impression 3D métal destinées à un large éventail d'industries.



Pour gagner, faites donc jouer Framatech !

54



FRAMATECH

Introduction à la FA

Panorama du marché, les secteurs industriels concernés et les usages

Tendances émergentes :

Personnalisation de masse :
Capacité à produire des objets personnalisés à grande échelle sans impact significatif sur les coûts de fabrication.

Particulièrement pertinent dans les secteurs comme :

- ✓ **Médical** (prothèses, implants personnalisés)
- ✓ **Mode et bijoux** (accessoires sur mesure)
- ✓ **Automobile** (pièces customisées pour les véhicules de luxe ou de course).

Production décentralisée
Réduction des chaînes d'approvisionnement → production local, proche de l'endroit où les pièces sont nécessaires.
Réduction des délais de livraison, des coûts logistiques + une flexibilité accrue, observé lors de la pandémie de COVID-19.

Fabrication Additive métal
La production de pièces métalliques finales, notamment dans les secteurs de l'aéronautique, de l'automobile et de la défense, permet de produire des composants complexes, plus légers et plus résistants que ceux fabriqués par les méthodes traditionnelles.

Bioprinting et santé
Fabrication de prothèses, d'implants dentaires ou d'appareils orthopédiques sur mesure est déjà bien développée.
À l'avenir, le **bioprinting**, qui consiste à imprimer des tissus vivants et potentiellement des organes humains est un domaine en pleine recherche.

Impression à grande échelle
Les imprimantes 3D deviennent de plus en plus grandes, permettant la fabrication de structures de grande taille, comme des maisons (via la technologie **construction 3D**), ou des pièces automobiles complètes.



Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !

55



FRAMATECH

Introduction à la FA

Panorama du marché, les secteurs industriels concernés et les usages

Défis et limites :

Coûts initiaux : Bien que les prix des imprimantes 3D aient baissé, le coût initial d'acquisition pour les imprimantes industrielles reste élevé.

Matériaux : L'accès à des matériaux variés, notamment pour le métal et les composites, peut rester un obstacle pour certaines entreprises


Qualité et normalisation : La standardisation des procédés et des matériaux reste un défi, surtout pour les industries à haute exigence comme l'aéronautique et la santé.

Vitesse : Bien que les progrès soient réalisés, les temps de production pour des pièces complexes peuvent encore être longs comparés aux méthodes de fabrication conventionnelles



Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !

56



FRAMATECH


**PARTIE II – Intégration
de la fabrication additive
dans l'organisation
industrielle**

Les prérequis techniques, organisationnels et les compétences associées

Les postes de coût de la FA : investissement, fonctionnement, comparaison des coûts de revient entre une fabrication traditionnelle (pièces moulées, usinage,...)

Intérêt de production d'une pièce en FA selon le contexte économique et/ou technique

Les normes dédiées à la FA : Norme ASTM F42(qualité des poudres, classification des pièces), ISO/TC261 et ISO 17296-2:2015: Normalisation dans le domaine de la fabrication additive, NF E 67-001 : terminologie



*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*

57



FRAMATECH

**PARTIE II – Intégration
de la fabrication additive
dans l'organisation
industrielle**

Les prérequis techniques, organisationnels et les compétences associées

L'intégration de la FA nécessite une planification minutieuse et des investissements spécifiques.

Voici les principaux **pré-requis** pour une intégration réussie de la fabrication additive dans une entreprise :

Évaluation des besoins et des objectifs : questions à se poser...

Quels types de produits (prototypage, pièces d'usage final, outils) ?
 Quelles quantités (petites séries, production en masse) ?
 Quels matériaux (métal, polymère, céramique, composites) ?
 Quels objectifs (réduction des coûts, amélioration des délais, personnalisation, innovation en conception) ?

Connaissances et expertise technique

La fabrication additive exige une expertise spécifique : conception, production, post-traitement...

Formation du personnel : Bureau d'Etudes, opérateurs, technicien maintenance...

Compétences en CAO et en simulation : Les pièces destinées à la fabrication additive doivent être conçues ou optimisées spécialement pour cette technologie (topologie optimisée, allègement, intégration de fonctions).

Support technique externe : Il peut être nécessaire de collaborer avec des prestataires externes pour fournir des conseils techniques sur les premiers projets ou pour effectuer des audits de faisabilité.

Infrastructure et installation :



*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*

58



FRAMATECH

**PARTIE II – Intégration
de la fabrication additive
dans l'organisation
industrielle**

Les prérequis techniques, organisationnels et les compétences associées

Infrastructure et installation :
L'installation de machines d'impression 3D nécessite une réflexion autour de son environnement.

Espace dédié : la technologie choisie peut nécessiter un espace avec des conditions spécifiques (température, ventilation, absence de poussière).
Il faut garantir la sécurité des personnes et la qualité des produits (ventilation, atmosphères inertes, etc.)

Installations des équipements annexes : fours pour recuit, systèmes de nettoyage), des stations de retraitement de poudre, ou des machines de finition (polissage, usinage), gestion des stocks de matières premières (poudres, résines), gestion des déchets...

Technologie et matières :
Evoqué dans la partie I :
Grande variété de technologies et de matériaux.
Le bon choix est aussi difficile qu'essentiel pour garantir la qualité des produits fabriqués (performance, respect des normes, coût...)



*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*

59



FRAMATECH

**PARTIE II – Intégration
de la fabrication additive
dans l'organisation
industrielle**

Les prérequis techniques, organisationnels et les compétences associées

Post-traitement et finition :
Il faut prendre en compte que de nombreuses pièces nécessitent des étapes de post-traitement.

Nettoyage : Retrait des supports ou des résidus de poudre.

Traitement thermique : Certains alliages métalliques doivent être traités par recuit ou durcissement pour améliorer leurs propriétés mécaniques.


Finition de surface : Polissage, usinage, ou peinture pour obtenir l'aspect ou la tolérance de surface souhaitée.

Contrôle qualité : Les pièces doivent être inspectées pour s'assurer qu'elles répondent aux tolérances dimensionnelles et mécaniques.



*Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !*

60



FRAMATECH

PARTIE II – Intégration de la fabrication additive dans l'organisation industrielle

Les postes de coût de la FA : investissement, fonctionnement, comparaison des coûts de revient entre une fabrication traditionnelle (pièces moulées, usinage,...)

La mise en place de la fabrication additive nécessite des investissements initiaux importants, et l'entreprise doit évaluer la rentabilité potentielle.


Voici quelques considérations :

Coût des machines : Les imprimantes 3D industrielles peuvent coûter de **10 000 à plusieurs millions d'euros** selon la technologie.

Coût des matériaux : Les poudres métalliques ou les résines spéciales peuvent être chères, nécessitant une gestion minutieuse des matières premières.


Retour sur investissement (ROI) : Il est essentiel d'évaluer le potentiel de réduction des coûts (notamment en matière de production, de délais, ou de stock) et les bénéfices en termes d'innovation et de personnalisation.

Modèle économique : Les entreprises doivent déterminer si l'impression 3D sera utilisée principalement pour la fabrication de pièces d'usage final, le prototypage, ou la production en série. Cela influence les coûts opérationnels et la rentabilité.



Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !

61



FRAMATECH


PARTIE II – Intégration de la fabrication additive dans l'organisation industrielle

Les postes de coût de la FA : investissement, fonctionnement, comparaison des coûts de revient entre une fabrication traditionnelle (pièces moulées, usinage,...)

Comparaison avec une fabrication traditionnelle → usinage


Plusieurs facteurs :

- ❖ Coût du matériau : les matériaux en FA sont généralement bien plus cher mais la technologie permet de consommer, généralement, moins de matière. L'optimisation du design prend de l'importance sur ce point.
- ❖ Complexité de la pièce : Les pièces très complexes nécessitent souvent des outils spéciaux et plus de temps d'usinage.
- ❖ Temps de production : l'impression en elle-même peut être "assez rapide" mais le post-traitement est parfois important. Le temps de lancement en production peut être beaucoup plus rapide que sur de l'usinage traditionnel.
- ❖ Quantité de production : L'usinage devient économiquement plus intéressant lorsque la quantité de pièces augmente. La programmation initiale et la mise en place de l'outillage sont amorties sur une plus grande quantité, ce qui réduit le coût unitaire pour les grandes séries.
- ❖ Post-traitement et finition : Les pièces usinées ont généralement une finition de surface plus précise directement à la sortie de la machine, avec peu de besoins de post-traitement.
- ❖ Coûts de main-d'œuvre : les 2 technologies demandent de la MO. La programmation en usinage est plus spécifique que la préparation des pièces pour la FA
- ❖ Coût des machines et amortissement : Les imprimantes 3D et les CN peuvent coûter très chers. Les imprimantes 3D n'ont pas besoin d'outillage mais peuvent avoir des consommables. Le taux de remplissage, le nombre de référence est à prendre en compte.




Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !

62



PARTIE II – Intégration de la fabrication additive dans l'organisation industrielle




Les postes de coût de la FA : investissement, fonctionnement, comparaison des coûts de revient entre une fabrication traditionnelle (pièces moulées, usinage,...)

Comparaison avec une fabrication traditionnelle → usinage


Plusieurs facteurs :

- ❖ Flexibilité et personnalisation : L'usinage est moins flexible, surtout pour des modifications fréquentes ou des conceptions sur mesure. Chaque modification nécessite une reprogrammation et parfois de nouveaux outils ou des configurations différentes. Cela augmente les coûts de manière non négligeable.
- ❖ Délais de livraison/réactivité : la FA permet de lancer rapidement les productions.
- ❖ Gestion des stocks et production à la demande : la FA permet de ne pas constituer des stocks coûteux et d'entreposer des pièces inutilisées

63



PARTIE II – Intégration de la fabrication additive dans l'organisation industrielle



Les postes de coût de la FA : investissement, fonctionnement, comparaison des coûts de revient entre une fabrication traditionnelle (pièces moulées, usinage,...)

Comparaison avec une fabrication traditionnelle → usinage

| Critère | FA | Usinage traditionnel |
|-------------------------------|---|---|
| Coût du matériau | Matériaux souvent plus coûteux | Moins de gaspillage, coût généralement inférieur |
| Complexité des pièces | Plus économique pour des formes complexes | Coûts augmentent avec la complexité |
| Temps de production | Long pour les pièces volumineuses | Plus rapide pour des pièces simples |
| Quantités produites | Compétitive pour petites séries ou prototypes | Plus rentable pour grandes séries |
| Post-traitement | Nécessaire pour la finition | Moins de post-traitement requis |
| Tolérances | Moins précises, nécessite souvent du post-usinage | Tolérances plus strictes directement possibles |
| Coût des machines | Investissement élevé, mais flexible | Investissement élevé, mais efficace pour la production en série |
| Coûts de main-d'œuvre | Réduits grâce à l'automatisation | Plus élevé, nécessite plus de supervision |
| Délais de livraison | Rapide pour des pièces complexes uniques | Plus long, surtout pour des séries moyennes ou grandes |
| Stockage et production | Production à la demande possible | Stockage nécessaire pour grandes séries |

64



PARTIE II – Intégration de la fabrication additive dans l'organisation industrielle



Les postes de coût de la FA : investissement, fonctionnement, comparaison des coûts de revient entre une fabrication traditionnelle (pièces moulées, usinage,...)

Comparaison avec une fabrication traditionnelle → Moulage

Plusieurs facteurs :

- ❖ Coût des matériaux : la matière pour le moulage est généralement bon marché
- ❖ Coût des outils et des machines : La création d'un moule peut représenter un coût très élevé. Cependant, ce coût est amorti sur de grandes quantités. Quantité de production.
- ❖ Complexité de la pièce.
- ❖ Temps de production : la FA permet de produire directement après la conception sans attendre la fabrication d'un moule.
- ❖ Flexibilité et personnalisation : Toute modification de la pièce nécessiterait de créer un nouveau moule, ce qui est coûteux et peut prendre beaucoup de temps.
- ❖ Tolérances et finition : Le moulage, en particulier l'injection plastique, permet d'obtenir des pièces avec une très bonne finition de surface et des tolérances strictes dès la sortie du moule.
- ❖ Choix des matériaux...
- ❖ Post-traitement : souvent nécessaire en FA.
- ❖ Coût de la main-d'œuvre : La fabrication d'un moule est un processus complexe qui nécessite une main-d'œuvre qualifiée




PARTIE II – Intégration de la fabrication additive dans l'organisation industrielle




Les postes de coût de la FA : investissement, fonctionnement, comparaison des coûts de revient entre une fabrication traditionnelle (pièces moulées, usinage,...)


Comparaison avec une fabrication traditionnelle → Moulage

| Critère | FA | Moulage traditionnel |
|-------------------------|---|---|
| Coût des outils | Pas de coût d'outillage, coût initial faible | Coût élevé pour la fabrication du moule |
| Quantité de production | Compétitive pour petites séries | Très rentable pour grandes séries |
| Complexité de la pièce | Très avantageuse pour des formes complexes | Limité par la complexité du moule |
| Temps de production | Peut être long pour des pièces volumineuses | Très rapide une fois le moule fabriqué |
| Coût des matériaux | Souvent plus élevé (poudres, résines) | Matériaux moins coûteux (granulés plastiques, métaux) |
| Tolérances et finition | Moins précises, nécessite du post-traitement | Très précises avec une bonne finition |
| Flexibilité | Très flexible pour les changements de design | Peu flexible (nouveau moule nécessaire pour toute modification) |
| Gaspillage de matière | Moins de gaspillage | Généralement peu de gaspillage, mais variable |
| Post-traitement | Nécessaire pour la finition et les tolérances | Post-traitement souvent minimal |
| Coût de la main-d'œuvre | Réduit grâce à l'automatisation | Main-d'œuvre nécessaire pour la fabrication du moule |
| Délais de développement | Rapide pour les prototypes et petites séries | Long pour le développement du moule |



FRAMATECH





Intérêt de production d'une pièce en FA selon le contexte économique et/ou technique

Pourquoi la fabrication additive pourrait être avantageuse ?

Personnalisation et Complexité

- **Avantage économique** : La fabrication additive permet de produire des pièces hautement personnalisées ou des conceptions complexes sans coût supplémentaire lié à l'outillage ou à la complexité géométrique.
- **Contexte technique** : Utilisé lorsque des pièces doivent intégrer des géométries complexes, des formes organiques, ou des structures internes (comme des canaux de refroidissement internes). La fabrication additive rend ces conceptions possibles, souvent à moindre coût qu'avec des méthodes traditionnelles.


Prototypage rapide

- **Avantage économique** : La possibilité de réaliser des prototypes directement à partir d'un fichier numérique permet de réduire les coûts et les délais liés à la fabrication de moules ou d'outils pour des séries limitées.
- **Contexte technique** : Idéal pour des cycles de développement de produit rapides, où plusieurs itérations de conception peuvent être réalisées et testées sans coût d'outillage supplémentaire.


Production en faible volume


- **Avantage économique** : Pour de faibles quantités de production, la fabrication additive est plus rentable que des méthodes comme l'injection plastique, où les coûts de moules sont élevés. Cela permet d'éviter des investissements initiaux élevés pour les petites séries.
- **Contexte technique** : Pour des marchés de niche, des séries limitées ou des besoins spécifiques en petite quantité, la fabrication additive est plus avantageuse économiquement que des processus traditionnels.

67



FRAMATECH





Intérêt de production d'une pièce en FA selon le contexte économique et/ou technique

Pourquoi la fabrication additive pourrait être avantageuse ?

Réduction des délais de production

- **Avantage économique** : Les délais de mise sur le marché sont réduits, car il n'y a pas de temps d'attente pour la fabrication des moules ou outils. Cela permet aux entreprises de répondre plus rapidement à la demande du marché.
- **Contexte technique** : Utilisé dans des secteurs où la vitesse de développement et de production est un facteur compétitif clé (comme l'automobile, l'aérospatiale ou le médical).

Réduction des déchets

- **Avantage économique** : En étant un processus additif, cette technologie permet d'utiliser seulement la quantité de matériau nécessaire pour la pièce. Cela réduit les coûts des matériaux et de la gestion des déchets.
- **Contexte technique** : Cela est particulièrement avantageux pour des matériaux coûteux comme les métaux précieux ou les alliages spécialisés, où la réduction des déchets est un facteur économique majeur.


Légèreté et Optimisation Topologique

- **Avantage économique** : La fabrication de pièces optimisées pour être plus légères, tout en conservant leurs propriétés mécaniques, permet de réduire les coûts liés aux matériaux ainsi que ceux d'exploitation (par exemple, réduction de la consommation de carburant dans l'aéronautique).
- **Contexte technique** : Les pièces légères sont souvent essentielles dans l'aérospatial et l'automobile, où la réduction du poids peut avoir des impacts importants sur les performances et la consommation d'énergie.


Réduction des stocks


- **Avantage économique** : La fabrication additive permet la production à la demande, ce qui peut réduire les coûts associés au stockage de grandes quantités de pièces de rechange ou de produits.
- **Contexte technique** : Utile dans les secteurs où les pièces de rechange doivent être produites de manière continue, comme l'industrie pétrolière, la défense ou les équipements industriels.

68



FRAMATECH





Intérêt de production d'une pièce en FA selon le contexte économique et/ou technique

Pourquoi la fabrication additive pourrait être avantageuse ?

Délocalisation de la production

- **Avantage économique** : Les entreprises peuvent produire localement sans avoir besoin de transporter des pièces à travers le monde, réduisant ainsi les coûts de logistique et de transport.
- **Contexte technique** : Utile dans les situations où des pièces doivent être produites sur place, par exemple dans des environnements isolés (stations spatiales, exploration de fonds marins, bases militaires).


Diminution du coût des matériaux exotiques

- **Avantage économique** : La fabrication additive permet de produire des pièces en matériaux rares ou exotiques (alliages spécifiques, composites, etc.) sans gaspillage de matière, ce qui est un avantage pour les industries qui utilisent des matériaux très coûteux.
- **Contexte technique** : Essentiel dans les industries telles que l'aéronautique, le médical (implants), et les sports de haute performance, où la performance des matériaux est un facteur critique.


Fabrication d'outillages et de moules personnalisés


- **Avantage économique** : La fabrication additive peut également être utilisée pour créer des outils spécifiques ou des moules en petites séries, permettant des économies substantielles par rapport aux techniques de fabrication conventionnelles.
- **Contexte technique** : Cela est particulièrement utile dans des secteurs qui nécessitent des moules ou des outils personnalisés pour des séries limitées.

69



FRAMATECH





Les normes dédiées à la FA :

→ Assurer la qualité, la répétabilité et la sécurité des produits fabriqués

ISO/ASTM 52900:2015 : collaboration entre l'ISO et l'ASTM. Pilier pour la structuration de la fabrication additive au niveau international.

Norme ASTM F42

comité technique de l'ASTM International,

- Normalisation des termes et définitions liés à la fabrication additive.
- Elaboration de protocoles de test et de critères d'acceptation pour les matériaux et les processus utilisés dans la fabrication additive.
- Création de directives pour la certification des pièces fabriquées par des processus additifs.

Le comité F42 est divisé en plusieurs sous-comités qui couvrent différents aspects de la fabrication additive :

- **F42.01** – Terminologie
- **F42.04** – Processus de test et méthodes d'essai pour évaluer la qualité des pièces imprimées
- **F42.05** – Matériaux de fabrication additive
- **F42.06** – sécurisation des processus de fabrication additive

→ **Norme créée** : **ASTM F2971** : Guide pour la qualification des machines de fabrication additive à base de métal.

ISO/TC261 :

Ce comité travaille en collaboration avec le comité ASTM F42 (cohérence internationale) _ Normes globales

- terminologies,
- les procédés de fabrication,
- les matériaux
- exigences de qualité

Pour les divers secteurs d'application, comme l'industrie aérospatiale, médicale, ou encore automobile.

ISO 17296-2:2015 :


Norme spécifique : bonnes pratiques et les paramètres clés

Spécifie les principes généraux de la fabrication additive ainsi que les paramètres qui influencent la qualité finale des pièces produites, comme la **température**, la **vitesse d'impression**, et d'autres éléments critiques pour assurer la précision et la qualité des pièces.


NF E 67-001 :


cette norme a été annulée et remplacée par la norme ISO/ASTM 52900:2015

70



FRAMATECH





Les normes dédiées à la FA :

→ Assurer la qualité, la répétabilité et la sécurité des produits fabriqués

Exemple de la F42.06 :

Objectifs principaux :

- Établir des lignes directrices et des normes pour garantir que les pratiques de la FA respectent les meilleures pratiques en matière d'environnement et de santé publique.
- Réduire les risques d'exposition aux matériaux potentiellement dangereux (comme les poudres métalliques utilisées en fabrication additive).
- Proposer des solutions pour le stockage et la manipulation des matériaux et des équipements en toute sécurité.

Environnement, santé et sécurité :


- Le sous-comité développe des protocoles pour le contrôle des émissions, la gestion des déchets et l'utilisation d'équipements de protection.
- Il identifie les risques associés aux procédés de fabrication additive, comme l'exposition aux nano-particules, aux poudres métalliques fines, ou aux gaz toxiques.

Cadre réglementaire et législatif :


- F42.06 collabore avec d'autres sous-comités pour s'assurer que les normes environnementales et de sécurité sont compatibles avec les réglementations locales et internationales.
- Les aspects de durabilité sont aussi pris en compte, avec des recommandations sur la réduction des impacts environnementaux.


Partie II_ diapo 52

71



FRAMATECH





DFAM _ Design for Additive Manufacturing

Liberté de conception : Principaux avantages

Formes complexes qui seraient difficiles, voire impossibles, à réaliser avec des méthodes de fabrication traditionnelles : géométries internes complexes, des structures en treillis et des pièces monoblocs assemblées sans soudeure.

Assemblages intégrés : mécanismes, par exemple : des charnières ou des engrenages

Optimisation topologique : performances mécaniques maximales avec un minimum de matériau

Quelques contraintes à prendre en compte :

- Épaisseur des parois
- Supports et orientation de la pièce
- Tolérances et précision
- Réduction des déformations et des contraintes résiduelles

Post-traitements :
Reprise d'usinage, insert, zone de polissage, position des supports...

Objectifs : Produire des pièces optimisées, fiables et performantes.

72



FRAMATECH

PARTIE III – Règles de conception

Présentation de différents logiciels :

- Rhinocéros
- Fusion 3D
- Materialise Magics
- Mira 3D
- LiveBuild
- Bambu Lab Studio
- Cura

Quel type de fichier ?

STL (StereoLithography)
maillage de triangle
Inconvénients : Ne contient que des informations géométriques, pas de données sur la couleur, les textures, ou les matériaux

OBJ (Object File Format) :
Permet de stocker des informations supplémentaires comme les **textures**, les **couleurs** et les **matériaux**.


AMF (Additive Manufacturing File Format) :
Peut inclure des informations sur les **couleurs**, les **textures**, les **matériaux** et même les **structures internes** des objets.

3MF (3D Manufacturing Format) :
Contient des informations complètes, y compris les **textures**, les **couleurs**, les **propriétés des matériaux**, et les **instructions d'impression**.
De plus en plus utilisé, car il est plus robuste et précis.



Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !

73




FRAMATECH

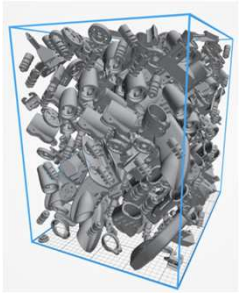
PARTIE IV – Les différentes opérations en production


Préparation des fichiers

Conception et mise en place des supports



Remplissage de la zone d'impression (Nesting, plateau)





Pour gagner,
faites donc jouer Framatech !

74



FRAMATECH





Fabrication :

Quelque soit le moyen utilisé, l'opération consiste à ajouter des couches les unes sur les autres...

Libération » des pièces :

Retrait du plateau de production
Opération majoritairement manuel mais la tendance est à l'automatisation




Déliantage (debinding) : Cette étape est nécessaire pour retirer le liant organique utilisé dans le processus d'impression poudre. Cela peut prendre du temps et doit être fait soigneusement pour éviter d'endommager la pièce.

75



FRAMATECH





Nettoyage des résines

Suppression des supports

Frittage (sintering) :

Les pièces doivent être frittées à haute température pour fusionner les particules métalliques et obtenir la densité finale. Ce processus peut provoquer un **retrait** ou une **déformation** des pièces si mal contrôlé.

76


FRAMATECH

PARTIE V – Le post-traitement (process & précautions)



Curing

Après impression, il est souvent nécessaire d'effectuer un **curing secondaire** (post-curing), en plaçant la pièce sous une lampe UV ou dans un four UV afin de durcir complètement le matériau et d'améliorer ses propriétés mécaniques.



Finitions métallisées, peinture, sablage...

77


FRAMATECH

PARTIE VI – Les moyens de contrôle non destructif



Mise au point et suivi en Production

Tomographie par rayons X (CT scan) _ CND

Permet de produire une image en 3D de la pièce afin de :

- **Détecter les défauts internes** comme les pores, les fissures, les inclusions de matériaux étrangers ou les manques de fusion (zones où les couches ne sont pas correctement fusionnées).
- **Mesurer l'épaisseur des parois** et d'autres dimensions internes qui ne sont pas facilement accessibles par des méthodes de mesure classiques.
- **Vérifier la densité** et la porosité des matériaux, des paramètres essentiels dans des pièces critiques (comme celles utilisées en aéronautique ou en biomédecine).

https://www.youtube.com/watch?v=B0IC-7RDvI0&ab_channel=TOMOMETRIX

Radiographie industrielle :

utilise des rayons X pour capturer des images bidimensionnelles (2D) de l'intérieur des pièces.

- Identifier les défauts tels que les fissures, les inclusions ou les pores dans les couches.
- Détecter des variations de densité dans la matière.

Analyse de la granulométrie de surface, Ra

78



**PARTIE VI –
Les moyens de
contrôle non
destructif**



Mise au point et suivi en Production

Test & fiabilité

Surveillance acoustique de la fabrication additive au laser

<https://actu.epfl.ch/news/fabrication-additive-au-laser-detection-de-defau-7/>

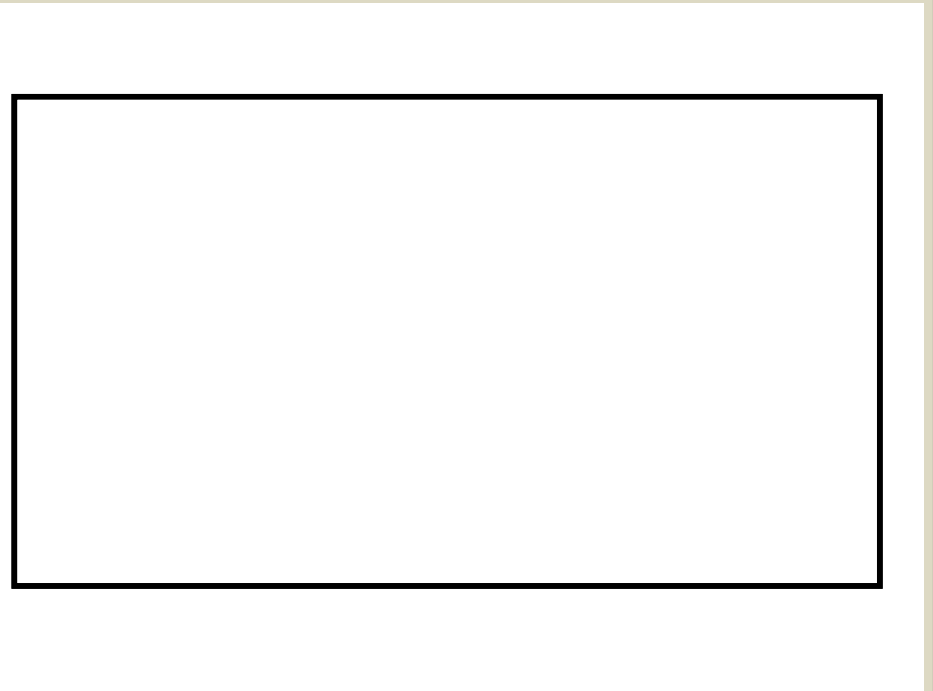
Ultrasons (UT) : Les ultrasons sont envoyés à travers la pièce pour repérer des discontinuités ou des défauts internes. Cette méthode est idéale pour les matériaux métalliques et composites.

Essais de fluorescence ou de magnétoscopie : Utilisée pour détecter des fissures ou des défauts de surface, cette méthode implique l'utilisation de liquides fluorescents ou magnétiques qui révèlent les imperfections sous des éclairages spécifiques.

Analyse de la granulométrie de surface, Ra



**PARTIE VI –
Les moyens de
contrôle non
destructif**





FRAMATECH






Mise au point et suivi en Production

Contrôle des propriétés mécaniques :


Des **épreuves** sont des pièces de test imprimées en parallèle des pièces finales permettant de mesurer et valider la qualité globale de l'impression.


- **Objectif** : Vérifier que les propriétés mécaniques de la pièce imprimée (telle que la résistance à la traction, la dureté ou la densité) sont conformes aux spécifications.
- **Validation de processus** : Les éprouvettes permettent de vérifier si les paramètres d'impression, comme la **puissance du laser**, la **vitesse de balayage**, ou la **stratégie de fusion**, sont optimisés pour le matériau utilisé.

81



FRAMATECH






- Fabrication de composants complexes
- Contraintes : pièces métalliques extrêmement résistantes, capables de fonctionner sous des conditions extrêmes de chaleur, de pression et de radiations.
- Applications potentielles ou déjà d'actualité : Pièces de rechange, composants obsolètes, pièces en très faible quantités.
- Prototypage rapide : réaliser rapidement des modèles fonctionnels, validation avant la mise en production de pièces critiques.
- Travaux sur les matériaux : les ingénieurs peuvent travailler sur des alliages métalliques qui sont à la fois plus légers et plus résistants à la corrosion, à l'usure, et aux températures élevées, tout en conservant une résistance mécanique élevée.

L'intégration de la FA dans l'industrie nucléaire des **défis** :

- **a) Certification et réglementation**
Le secteur nucléaire est fortement réglementé et chaque composant utilisé dans un réacteur doit répondre à des normes strictes en matière de **sécurité** et de **qualité**. Les pièces imprimées en 3D doivent donc passer des processus rigoureux de certification, y compris des tests de résistance à la chaleur, aux radiations et à la corrosion.
- **b) Propriétés des matériaux**
Même si l'impression 3D permet d'utiliser des matériaux avancés, la **stabilité** et la **durabilité** à long terme des pièces imprimées dans des environnements aussi exigeants que les réacteurs nucléaires restent une préoccupation. Des recherches sont en cours pour garantir que les propriétés des pièces imprimées résistent aux conditions extrêmes du nucléaire.
- **c) Limites de taille**
L'impression 3D, bien que très efficace pour des pièces de petite à moyenne taille, peut rencontrer des limites pour la production de composants plus grands, comme des **carters de réacteur** ou des **tuyaux** massifs. Des solutions pour imprimer des pièces plus grandes sont en cours de développement, notamment avec des machines de plus en plus grandes ou des techniques d'**assemblage** après impression.

82



FRAMATECH


FA et applications nucléaires


Exemple d'application :

Westinghouse : fabrication de composants de réacteurs nucléaires en **alliage Inconel** pour des essais en conditions réelles dans des centrales. Ils ont imprimé des composants complexes, réduisant ainsi les délais de fabrication.


ORNL (Oak Ridge National Laboratory) : Aux États-Unis, le laboratoire ORNL a travaillé sur la fabrication additive pour des pièces destinées aux réacteurs modulaires avancés (SMR), démontrant que l'impression 3D peut jouer un rôle clé dans la construction de ces réacteurs plus petits.

Rosatom (Russie) : L'entreprise russe a utilisé l'impression 3D pour produire des composants destinés à ses réacteurs nucléaires, notamment pour des pièces de remplacement.







83




FRAMATECH

Quel futur pour la FA ?

L'impression 3D a un fort potentiel pour révolutionner de nombreux secteurs en optimisant la production, en réduisant les déchets et en facilitant la personnalisation. Les progrès dans les matériaux, les logiciels, et les technologies (comme la multi-matériaux ou l'intégration de capteurs) élargiront encore les possibilités. À l'avenir, l'impression 3D jouera un rôle clé dans la **fabrication décentralisée**, la **réduction des délais de commercialisation**, et l'**innovation dans la conception de produits**.



84



Conclusion



La FA continue de transformer de nombreux secteurs, de la santé à l'aéronautique, grâce à ses avantages en termes de flexibilité de conception, de personnalisation et de réduction des déchets.

Malgré ses défis actuels, notamment en termes de vitesse et de coûts, les innovations technologiques et matérielles promettent un avenir encore plus intégré et performant pour la fabrication additive.

Méthode particulièrement précieuse dans des secteurs comme l'aéronautique ou l'automobile où la réduction de la masse est essentielle pour améliorer les performances et l'efficacité énergétique.

Par rapport à des procédés traditionnels tels que le moulage ou l'usinage, la FA permet de réduire considérablement les délais de production, surtout pour des pièces complexes ou sur mesure : plus de moules ou d'outils..

Cela permet d'accélérer la mise sur le marché des produits, un avantage significatif pour les industries compétitives.

Cela représente un grand intérêt pour les industriels où il arrive souvent que seulement 20% de la matière achetée soit réellement utilisée pour produire la pièce finale.

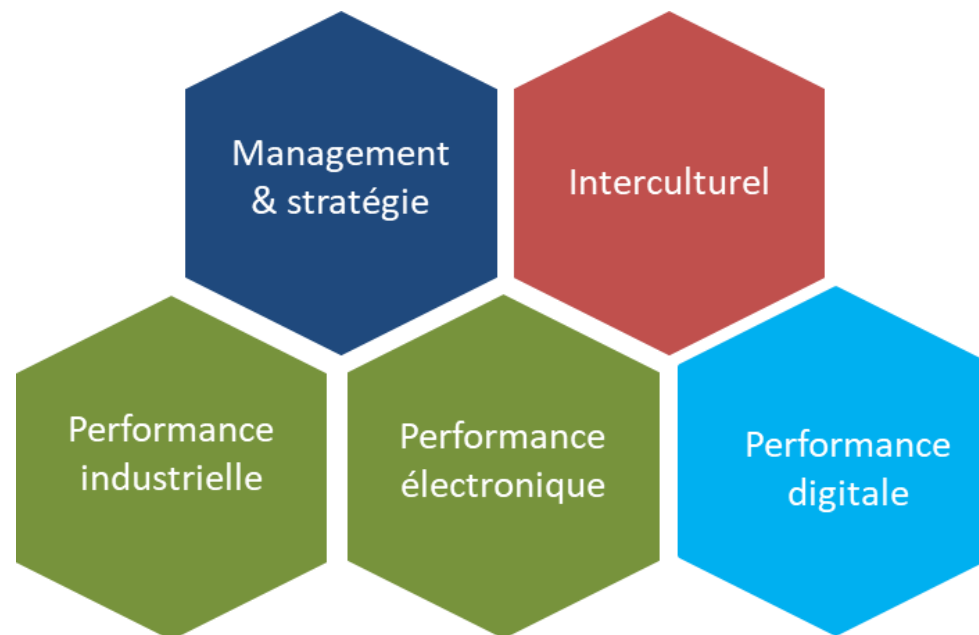
L'impression 3D pourrait devenir un pilier central de la production dans les décennies à venir.

CYCLE PERFORMANCE DIGITALE



FRAMATECH

Une offre de formations adaptée à vos situations professionnelles



FRAMATECH S.A. au capital de 38112 Euros

Etudes & mises en œuvre de stratégies industrielles internationales - Hautes Technologies

4 Boulevard d'Arras - 13004 Marseille - France

Tél. +33 491 95 55 70 | Mail : contact@framatech.fr | Web : www.framatech.fr

Organisme de formation n° 93060115506 – Siret 344 351 879 00046 – NAF : 7112B