

Fabrication additive

Principes généraux

par **Floriane LAVERNE**

Professeur agrégé

Laboratoire Conception de Produits et Innovation (LCPI), Arts et Métiers ParisTech, Paris, France

Frédéric SEGONDS

Maître de conférences

Laboratoire Conception de Produits et Innovation (LCPI), Arts et Métiers ParisTech, Paris, France

et **Patrice DUBOIS**

Maître de conférences

Laboratoire Conception de Produits et Innovation (LCPI), Arts et Métiers ParisTech, Paris, France

1. Principe de la Fabrication Additive	BM 7 017v2 - 2
1.1 Définition de la fabrication additive	— 2
1.2 Atouts de la fabrication additive	— 3
1.3 Usages associés à la fabrication additive	— 4
1.4 Domaines d'utilisation.....	— 6
2. Chaîne numérique de la Fabrication Additive : du modèle au produit	— 7
2.1 Création d'un modèle numérique 3D du produit	— 7
2.2 Conversion et contrôle des données.....	— 8
2.3 Préparation de la production et fabrication	— 8
2.4 Post-traitement.....	— 9
3. Triptyque matériaux/procédés/machines en Fabrication Additive	— 9
3.1 Matériaux	— 9
3.2 Procédés	— 9
3.3 Machines pour la FA.....	— 13
4. Évolutions liées à la Fabrication Additive	— 14
4.1 Processus de conception.....	— 14
4.2 Émergence d'un nouvel écosystème	— 14
5. Conclusion	— 14
6. Glossaire	— 14
Pour en savoir plus	Doc. BM 7 017v2

Depuis le début des années 1980, le déploiement de la révolution numérique impacte directement notre quotidien : mondialisation accrue des marchés, concurrence exacerbée imposant aux entreprises une réactivité optimale, et une capacité d'adaptation constante au renouvellement des produits et des services.

Ainsi, afin de conserver et/ou d'acquérir de nouvelles parts de marché compte tenu du taux de renouvellement accéléré des produits, les entreprises doivent :

- maîtriser leurs coûts ;
- améliorer constamment la qualité de leurs produits/services ;
- réduire drastiquement leurs délais de développement et de mise sur le marché.

Pour répondre à ces critères essentiels de réussite, les entreprises s'adaptent en permanence à de nouveaux environnements externes et doivent intégrer au sein de leur processus de conception (et de leur organisation) les technologies issues de l'évolution numérique.

Le premier brevet en lien avec la **Fabrication Additive** (FA) déposé par l'équipe de Jean-Claude André déclenche une révolution dans le domaine des procédés de fabrication et par extension dans le domaine de la production. D'un premier fabricant en 1986 (3D Systems), on comptabilise une cinquantaine de fabricants de machines en 2015.

La FA impacte actuellement tous les domaines de l'industrie et notamment les industries automobile, aéronautique et médicale.

Durant les premières années de la FA (années 1990 à 2000), les applications concernent essentiellement les phases amont de la conception de produits : maquettes d'aspect, maquettes fonctionnelles, prototypes technologiques mais aussi l'exploration de la conception d'outillages dits « rapides ». Ce n'est qu'à partir des années 2010 que l'on peut considérer la maturité des procédés telle qu'elle permet une production en série de pièces manufacturées.

Après avoir introduit les principes de la FA, nous présenterons dans cet article les différentes étapes permettant de passer de l'idée au produit, puis nous analyserons sous l'angle particulier de la FA le triptyque matériaux/procédés/machines. Enfin, nous proposerons une description des évolutions nécessaires en lien avec cette nouvelle technologie, tant sur le plan des processus de conception que sur celui de l'écosystème dans lequel la FA se déploie.

1. Principe de la Fabrication Additive

1.1 Définition de la fabrication additive

La norme NFE 67-001 [1] définit la **fabrication additive** comme « l'ensemble des procédés permettant de fabriquer, couche par couche, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique ».

Cependant, si l'acceptation de la fabrication additive (FA) est aujourd'hui normalisée, il n'est pas rare que d'autres termes soient utilisés pour parler de cette technologie de fabrication. Les plus récurrents, bien que pouvant être parfois considérés comme réducteurs, sont :

- fabrication par couches ;
- impression 3D ;
- fabrication digitale ;
- prototypage rapide ;
- production rapide.

Le principe physique sur lequel repose la FA est utilisé dès la fin du XIX^e siècle dans le cadre de la photosculture et de la topographie [2]. Il consiste à réaliser un produit grâce à un empilement successif de strates. La préparation de la maquette numérique permet de définir les sections de l'objet 3D à réaliser par son découpage successif par des plans parallèles. La distance entre chaque section correspond à l'épaisseur d'une couche. Pour reconstituer l'objet, les sections sont empilées séquentiellement les unes sur les autres (figure 1).

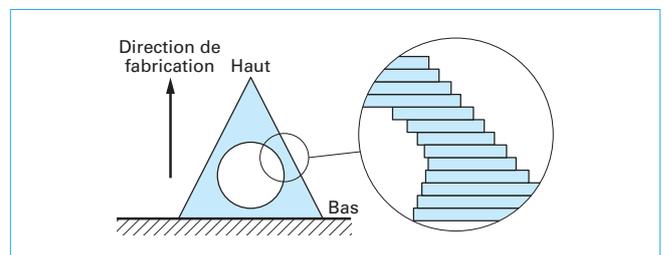


Figure 1 – Principe de la fabrication additive

La FA est donc issue d'un processus de fabrication génératif se résumant à deux étapes réitérées jusqu'à l'obtention du produit fini :

1. Génération d'une couche de matière suivant un contour et une épaisseur fixés. La matière est déposée uniquement là où elle est nécessaire ;
2. Réalisation de la nouvelle couche par addition de matière au-dessus de la couche précédente. La fabrication peut se résumer à une fabrication dite en **escalier** (figure 1).

Ainsi, du fait de ce principe d'ajout de matière, la FA bouleverse les techniques de fabrication dites traditionnelles que sont :

- les procédés par enlèvement de matière (tels que l'usinage) où le produit est réalisé à partir d'une ébauche brute sur laquelle la matière va être progressivement enlevée afin de lui conférer une forme finale ;
- les procédés de formage (tels que la fonderie ou la forge à chaud) dans lesquels la matière est amenée dans un état liquide ou visqueux, puis est mise en forme par écoulement dans un moule ou par rapprochement de deux matrices.

1.2 Atouts de la fabrication additive

Grâce à la FA, les outillages dédiés ou les ébauches brutes de matière inhérents aux procédés traditionnels deviennent inutiles et les contraintes liées à leur conception et leur fabrication sont alors levées (gains de temps et d'argent). Ainsi, les possibilités uniques de la FA offrent de nouvelles perspectives pour la réalisation de formes complexes (inclusion, cavité...), irréalisables par des procédés tels que l'usinage.

On dénombre quatre types de complexités [3] :

- géométrique ;
- hiérarchique ;
- matériau ;
- fonctionnelle.

1.2.1 Complexité géométrique

C'est le premier intérêt de la FA en termes de fabrication de produits. En effet, il est possible de réaliser n'importe quelle géométrie en une seule opération et donc de repousser les limites des techniques traditionnelles.

D'une part, la possibilité de produire des géométries complexes sans contrainte supplémentaire s'explique par le fait que les problèmes de géométrie, traités en 3D en fabrication traditionnelle, sont ici décomposés en une série de problèmes 2D beaucoup plus faciles à appréhender. Ainsi, puisque le produit est fabriqué couche par couche, il est possible d'obtenir des formes creuses sans avoir recours au noyautage ou aux dépouilles, ou sans devoir prendre en compte l'accessibilité des outils lors de la réalisation de canaux internes non rectilignes. De plus, les formes complexes n'ont plus besoin d'être scindées sur différents composants qui seront assemblés ultérieurement, ce qui conduit à la diminution du nombre de pièces et à la réduction (voire la suppression) des opérations d'assemblage.

D'autre part, fabriquer des géométries complexes internes ou externes en FA n'engendre pas de surcoût. Ce constat semble d'autant plus paradoxal que c'est l'inverse qui se produit dans le cas des procédés traditionnels, car les géométries complexes nécessitent de nombreuses opérations pouvant s'avérer rédhibitoires en termes de temps et de coûts ou étant, dans certains cas, irréalisables.

1.2.2 Complexité hiérarchique

Avec la FA, il est désormais possible de réaliser des produits à structures complexes de type treillis, alvéolaires ou bioniques (figure 2 et [4]) sans opération d'assemblage (boulonnage, soudage, rivetage, etc.) des différents éléments. De plus, elle permet de réaliser les motifs d'une structure à différentes échelles, du microscopique jusqu'au macroscopique, sur le modèle des fractales.

L'intérêt principal de cette complexité hiérarchique est l'allègement des produits : les structures pleines peuvent être remplacées par des structures beaucoup plus légères, mais présentant des propriétés mécaniques équivalentes.

1.2.3 Complexité matériau

Une pièce peut être qualifiée de multi-matériaux lorsqu'elle est constituée d'au moins deux matériaux dont la distribution varie en fonction de l'épaisseur. La figure 3 illustre de façon schématique ces deux principes en l'appliquant à un prototype de semelle de chaussure de sport.

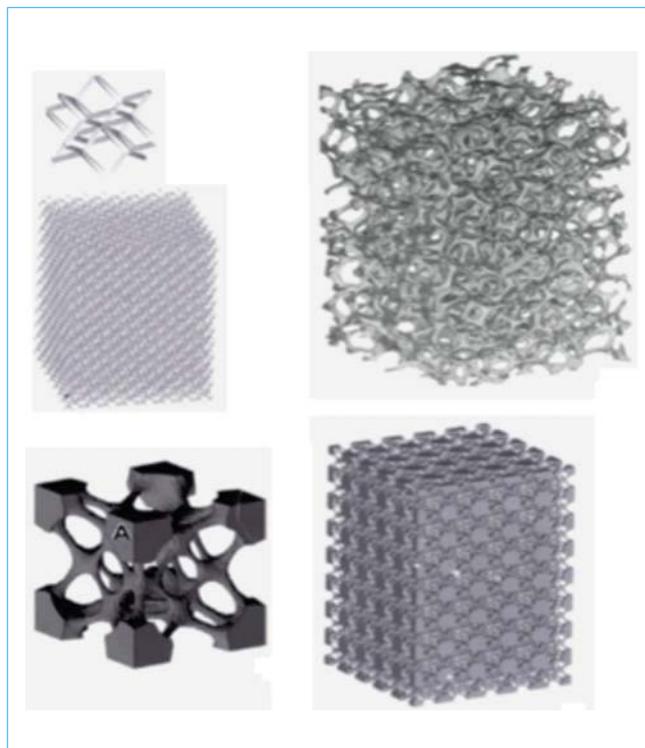


Figure 2 – Exemples de structures complexes réalisables en FA (crédit Murr, et al. [4])

Dans le cas d'une **distribution continue**, les matériaux obtenus sont appelés **matériaux à gradient fonctionnel de propriétés** (ou *Functionally Graded Material* – FGM) [5]. Il s'agit de matériaux composites dont la composition et la microstructure évoluent progressivement dans la pièce, conduisant ainsi à une variation des propriétés mécaniques. La performance globale du matériau est alors supérieure à celle des composants pris séparément.

La **distribution discontinue** permet l'obtention de pièces constituées d'un empilement de zones mono-matériau. La complexité matériau obtenue dans ce cas-là est plus élémentaire, car les performances obtenues sont inférieures à celles des matériaux à gradient de propriétés.

On perçoit donc tout le potentiel que peut offrir la FA dans la réalisation de ces pièces multi-matériaux : au sein d'une même couche, la matière étant déposée point par point ou simultanément, il est possible de réaliser n'importe quelle composition apportant au produit des propriétés mécaniques, thermiques ou chimiques uniques.

1.2.4 Complexité fonctionnelle

Avec la FA, des ensembles complets de composants pré-assemblés et prêts à l'emploi peuvent être fabriqués. On peut ainsi inclure des corps étrangers en cours de fabrication, ce qui permet une augmentation de la richesse fonctionnelle des produits fabriqués. Par exemple, il est possible de prévoir dès la conception des cavités qui pourront accueillir pendant la fabrication des corps tels que des écrous, de la fibre optique, des composants électroniques ou électriques. L'inclusion permet de réduire le nombre de procédés nécessaires à la fabrication d'une pièce, d'éliminer l'assemblage *a posteriori* et de pallier la difficile maîtrise des matériaux à gradient.

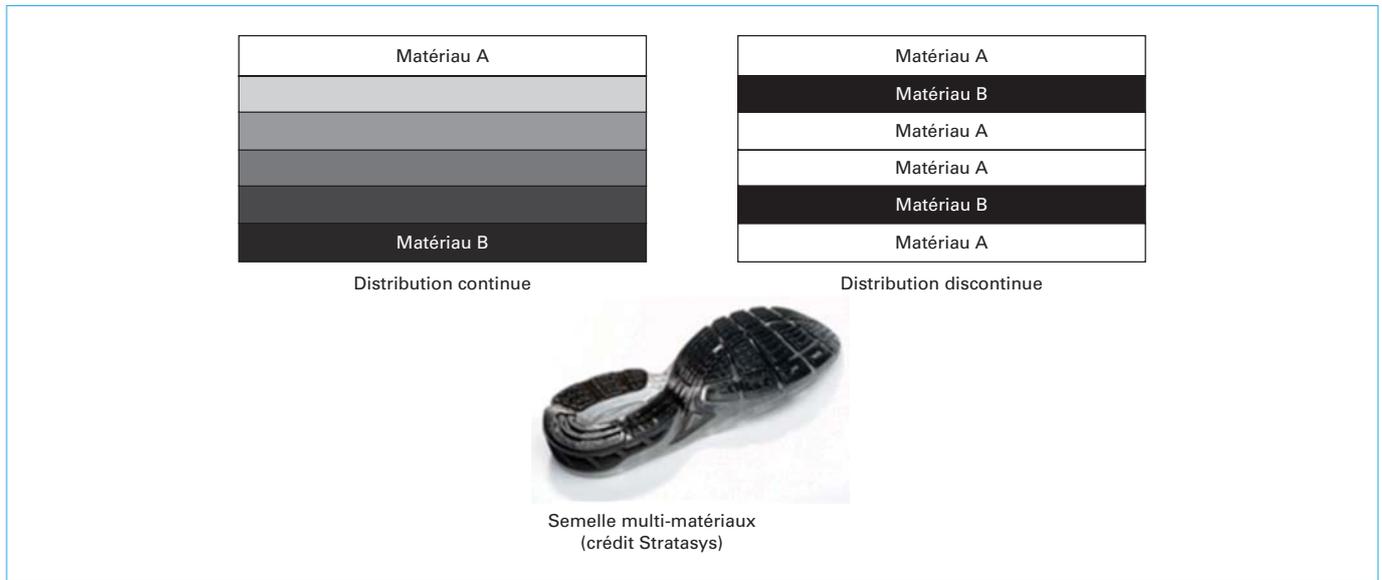


Figure 3 – Illustration de la complexité matériau permise par la FA

1.3 Usages associés à la fabrication additive

La FA a connu un essor industriel à partir de 1988, date de la mise sur le marché d'une machine développée par Hull [6]. Elle n'a ensuite pas cessé d'évoluer au rythme d'améliorations techniques et technologiques successives [7], permettant un accroissement des usages possibles : le prototypage rapide et la fabrication rapide. La figure 4 présente les différents usages de la FA qui sont détaillés dans la suite de cet article.

1.3.1 Prototypage Rapide

D'un point de vue industriel, le **Prototypage Rapide** (PR) a été le vecteur de développement de la FA. En effet, la réalisation de prototypes était considérée comme une étape complexe, fastidieuse et coûteuse [3] qui ralentissait le processus de conception. La technologie FA a diminué le temps de mise sur le marché, car elle permet d'obtenir rapidement les représentations intermédiaires physiques servant à la validation des étapes de conception ou de

développement d'un produit (forme, aspect, ergonomie...) et ce avant sa version finale et sa commercialisation. On distingue deux approches dans le PR : la modélisation de concepts et l'obtention de prototypes fonctionnels.

La modélisation de concepts est utilisée pour obtenir une représentation 3D d'un concept de base afin d'en juger l'aspect général et/ou les proportions. Avec le PR, les modèles obtenus ne peuvent pas subir d'effort, mais l'introduction de la couleur sans opération ultérieure de peinture est possible.

Les prototypes fonctionnels sont utilisés, quant à eux, pour la validation d'une fonction spécifique du produit (tenue mécanique, propriétés thermiques etc.), d'un objectif de conception (fabrication, maintenance, sécurité...), voire l'utilisation ou le fonctionnement du concept. Ils sont donc un outil d'aide à la décision, même si la représentation intermédiaire qui a été créée ne peut pas être utilisée en tant qu'élément constitutif du produit final. À partir du milieu des années 1990, l'application de la FA limitée exclusivement au PR s'est orientée vers une nouvelle approche : la **Fabrication Rapide**.

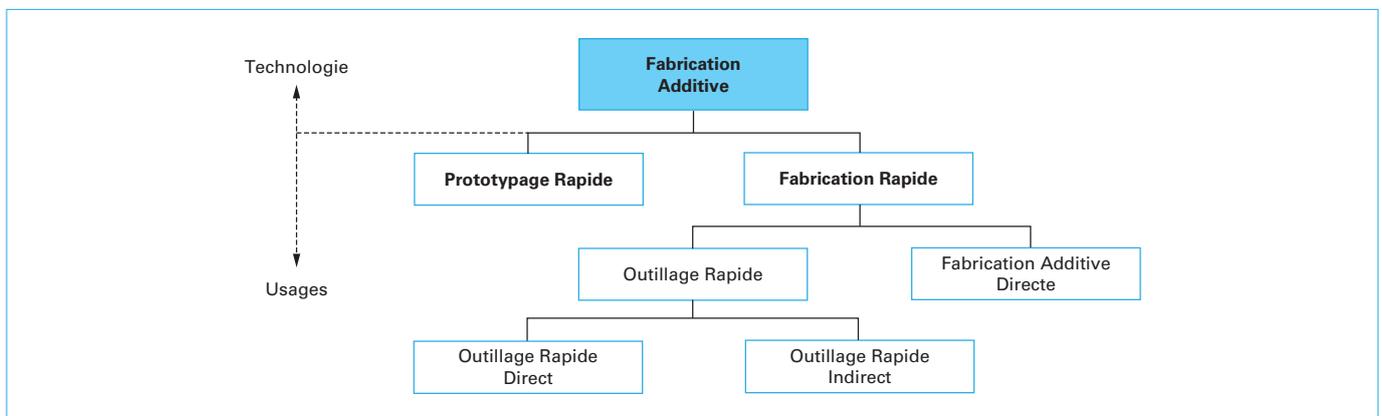


Figure 4 – Usages de la fabrication additive

1.3.2 Fabrication Rapide

L'intérêt croissant pour la **Fabrication Rapide** (FR) de la part des industriels s'explique notamment par l'arrivée à maturité de certains procédés, tels que la fusion sur lit de poudre, désormais bien maîtrisés et pour lesquels la précision des machines s'est accrue, la gamme de matériaux disponibles s'est élargie et les propriétés mécaniques des pièces sont devenues comparables à celles réalisées avec d'autres techniques de fabrication [BM 7 900]. Ces éléments ont ainsi permis la fabrication en FR de produits à même de respecter l'ensemble des caractéristiques et des fonctions fixées par le cahier des charges. Toutefois, il est nécessaire de distinguer au sein de l'approche FR, l'**Outillage Rapide** et la **Fabrication Additive Directe**.

1.3.2.1 Outillage Rapide

L'idée de base de l'**Outillage Rapide** (OR) est apparue dans les années 1990. À son origine, l'OR a été uniquement utilisé pour obtenir une empreinte servant à la validation des gammes de fabrication lors des tests de pré-industrialisation. Par la suite, son usage a été étendu à la fabrication d'outillages fonctionnels de formes complexes (matrices, moules d'injection...) destinés à la production en grandes séries. L'OR est donc une utilisation indirecte de la FA puisque seuls les outillages et non les produits finaux sont réalisés de façon additive.

L'OR a ainsi permis de réduire les temps de développement et de fabrication car les modifications de l'outillage peuvent être faites rapidement et sans avoir recours à des procédés de fabrication coûteux, tels que l'usinage ou l'électro-érosion.

On distingue deux catégories au sein de l'OR (figure 5) :

- **Outillage Rapide Direct** où la FA est utilisée pour obtenir directement le moule ou l'empreinte à partir d'un modèle CAO ;
- **Outillage Rapide Indirect** où la FA est utilisée pour créer un modèle qui servira ensuite à faire le moule à partir duquel le produit sera réalisé (cas de la fonderie à la cire perdue).

1.3.2.2 Fabrication Additive Directe

Par **Fabrication Additive Directe** (FAD) on entend l'élaboration de produits ou de composants denses (densité proche de 1) et résistants mécaniquement, c'est-à-dire finis et fonctionnels.

La part de FAD dans la FA n'a cessé de croître ces dernières années, passant de 4 % en 2001 à 28,3 % des pièces produites en 2013 [8].

Pour une production en petite série (environ 10 000 pièces plastiques ou 1 000 pièces métalliques) mais également pour les pièces complexes ou à haute valeur ajoutée, la FAD permet des coûts de production très compétitifs par rapport aux technologies traditionnelles qui doivent faire face à des budgets initiaux élevés liés à l'achat des outillages ou des machines et à la mise au point de leur process de fabrication (figure 6). La FAD permet également une réduction conséquente des pertes de matière : seulement 3 % de pertes pour certaines pièces aéronautiques fabriquées en FA contre 80 à 90 % de copeaux pour celles obtenues par usinage.



Figure 5 – Outillage indirect ou direct : exemples (crédits Voxeljet et EOS)

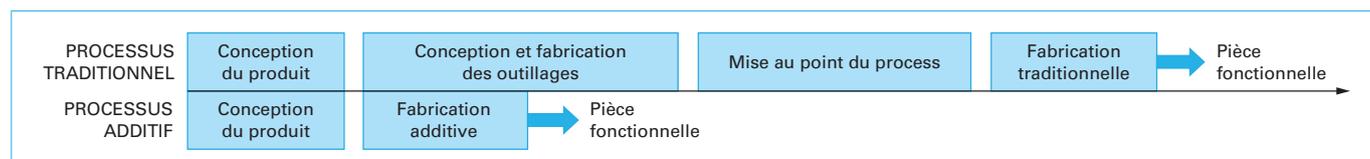


Figure 6 – Impact du processus choisi sur les temps et étapes de développement et fabrication d'une pièce fonctionnelle

1.4 Domaines d'utilisation

La FA n'a pas vocation à supplanter les procédés de fabrication traditionnels, mais bien à apporter une réponse technologique à leurs limites. Grâce aux atouts de la FA présentés dans le paragraphe 1.2, de nouvelles perspectives d'innovation dans le domaine des produits apparaissent, particulièrement dans le cadre de la FAD. Aujourd'hui trois grands domaines sont impactés par ces perspectives :

- fabrication à la demande et customisation ;
- fabrication de petites séries ou à forte valeur ajoutée ;
- fabrication sur mesure.

La fabrication à la demande ou customisation est le domaine d'usage de la FA le plus ancien et le plus implanté. Il s'adresse essentiellement à un usage dit grand public de la FA.

Les secteurs de l'aéronautique, de la défense et du spatial ont été des pionniers dans le domaine de la fabrication de petites séries ou à forte valeur ajoutée ; même si aujourd'hui d'autres secteurs tels que le sport automobile s'y intéressent également (figure 7).

L'enjeu majeur est de bénéficier des allègements de masse permis par l'utilisation des formes complexes, de simplifier les assemblages, voire de pallier les difficultés liées à l'usinage de certains métaux comme l'inconel. Des pièces fabriquées en FAD sont d'ores et déjà sur le marché.

À titre d'**exemple**, après General Electric pour le moteur Leap, la société Turbomeca s'est lancée dans la fabrication additive pour son programme « Ligne du Futur ». Ainsi, une machine de fusion sur lit de poudre (Fusion Sélective par Laser) est aujourd'hui qualifiée pour la production en série des tourbillonneurs de chambre de combustion pour les moteurs Ardiden 3 (environ 1 000 moteurs par an) et des injecteurs de carburant pour les moteurs Arrano équipant les hélicoptères de la classe des 4 à 6 t. L'utilisation de la FA pour les injecteurs a ainsi permis de réduire l'assemblage de 12 pièces à un système monobloc avec des formes internes irréalisables jusqu'ici (figure 8).



Figure 7 – Roll-loop de Formule1 (crédit Poly-Shape)

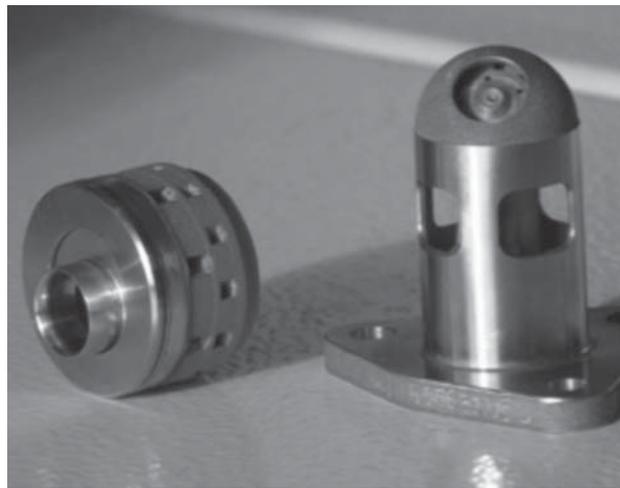


Figure 8 – Injecteur de carburant et tourbillonneur de chambre de combustion (crédit Turbomeca – R. Bertrand)



Figure 9 – Volet-crânien en Ti6Al4V obtenu avec un procédé de fusion sur lit de poudre (crédit Murr, et al. [4])

Cependant, malgré tout l'intérêt de la FA dans ces secteurs, l'obstacle majeur demeure le délai nécessaire à l'homologation et la qualification des pièces que ce soit pour une première utilisation du produit ou pour la maintenance. Compte tenu de la rapidité des évolutions technologiques, ce délai peut parfois conduire à la qualification d'un procédé devenu entre-temps obsolète.

Le marché de la fabrication sur mesure a également été largement adopté par le secteur médical et représente en 2014 13,7 % du marché de la FAD selon le rapport Wohlers. La FA offre la possibilité de réaliser des prothèses auditives, des volets crâniens (figure 9 et [4]), des implants dentaires ou orthopédiques parfaitement adaptés à la morphologie du patient et dans des matériaux biocompatibles (alliages Titane type Ti6Al4V ou alliage Chrome Cobalt). D'après le cabinet McKinsey, 40 000 prothèses de hanche ont été produites en 2012 en FA. La possibilité de fabriquer des

implants utilisant des structures treillis, impossibles à réaliser jusqu'alors, a été un second déclencheur de l'adoption de la FA. En effet, les structures treillis ont démontré leur utilité, car elles favorisent la croissance des tissus organiques et sont, à propriétés égales, plus légères. Enfin, les perspectives offertes par la FA dans le domaine médical sont telles que des travaux de recherche s'intéressent désormais à la fabrication additive d'organes à partir de cellules destinés à être implantés sur des patients vivants. Bien que le secteur médical soit le meilleur exemple de l'utilisation de la FA pour la fabrication sur mesure, d'autres secteurs comme la bijouterie ou l'art ont également vu la possibilité avec la FA de développer, dans des délais courts, des produits spécifiques à chacun de leurs clients.

2. Chaîne numérique de la Fabrication Additive : du modèle au produit

L'essor de la FA a également été grandement facilité par l'augmentation des capacités de traitement des ordinateurs. En effet, c'est grâce à leur puissance de calcul accrue que s'est développée la conception assistée par ordinateur (CAO) permettant la représentation 3D d'objets numériques et suscitant l'envie de les fabriquer [3].

À l'image des procédés traditionnels, la FA s'appuie également sur une succession d'opérations permettant de passer de l'objet numérique à l'objet réel : on parle de **chaîne numérique**. Celle-ci peut être décomposée en un séquençage de quatre étapes schématisées sur la figure 10 :

1. création d'un modèle numérique 3D du produit à fabriquer ;
2. conversion et contrôle des données ;
3. préparation de la fabrication et fabrication ;
4. parachèvement du produit.

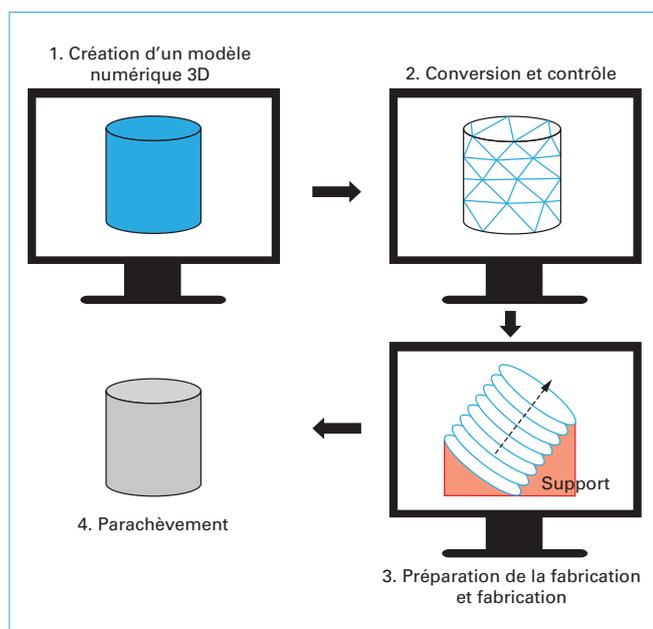


Figure 10 – Chaîne numérique associée à la FA

2.1 Création d'un modèle numérique 3D du produit

Toute pièce destinée à être fabriquée en FA doit posséder un modèle numérique qui décrit parfaitement sa géométrie. Ce modèle numérique peut être obtenu de différentes façons, la plus simple étant l'utilisation d'un logiciel CAO. Nous verrons que le *reverse engineering* peut également être utilisé.

2.1.1 CAO directe

Le développement de produits nécessite de s'intéresser au processus de conception permettant de passer d'une idée préconçue du produit à sa description détaillée, puis à sa fabrication. Après la phase de conceptualisation qui peut prendre plusieurs formes (esquisse, dessin, maquette ou modèle), il est nécessaire de produire une description du produit sous une forme numérique appelée **maquette numérique**, qui, à l'heure de l'ingénierie collaborative, peut être partagée par les différents acteurs de la conception.

Les logiciels de CAO 3D permettant la création de ces maquettes numériques sont fondés sur la modélisation surfacique ou sur la modélisation solide (ou volumique).

En modélisation surfacique, l'objet est défini par son enveloppe, ses surfaces-frontières. La description des surfaces est réalisée à l'aide d'équations polynômiales paramétriques telles que celles des *B-Splines* ou des *NURBS (Non Uniform Rational B-Spline)*. L'accent est mis sur des considérations de style/forme plutôt que sur des considérations technologiques. On retrouve des modélisations destinées essentiellement aux métiers de l'aéronautique, de l'automobile ou du design industriel (exemple : Atelier *Generative Shape Design* de Catia®, Alias®, Rhino®).

La modélisation volumique/solide est plus répandue que la modélisation surfacique. Elle intègre la notion de matière et repose sur les techniques de construction B-Rep « *Boundary Representation* » et CSG « *Constructive Solid Geometry* ».

La construction B-Rep utilise des primitives (en général esquisses 2D) permettant de créer grâce à diverses opérations (extrusion, révolution...) des volumes, qui, combinés entre eux, conduisent au solide final.

Une approche CSG est créée par une succession d'opérations booléennes (union, intersection, soustraction) réalisées sur des solides génériques (sphère, cylindre, parallélépipèdes).

Actuellement, les modélisateurs solides (PTC Creo®, SolidWorks®, TopSolid®...) permettent d'appliquer une matière à une pièce et intègrent la conception paramétrique et des historiques de construction.

2.1.2 Reverse engineering

La modélisation géométrique implique aussi de savoir reconstruire des objets à partir de la numérisation d'objets existants lorsque la maquette numérique est indisponible ou inexistante. On parle alors de **reverse engineering** ou **rétro-conception**. Cette technique est utilisée dans des domaines très variés tels que l'art (par exemple, pour la reproduction de statues) ou le médical (par exemple, pour la réalisation de prothèses sur mesure).

Le *reverse engineering*, dont le processus est illustré à la figure 11, repose sur l'acquisition d'un nuage de points représentant les surfaces enveloppes de l'élément numérisé. Ces ensembles de points sont ensuite traités à l'aide de logiciels de reconstruction de surfaces permettant de définir la peau de l'objet à l'aide d'entités mathématiques, puis d'exporter vers un logiciel de CAO. Le modèle 3D est ensuite modifié, adapté à son environnement et à son architecture interne. Il est également possible, à partir du nuage de points, de réaliser un maillage STL (*Stereolithography*) et d'obtenir, après contrôle des erreurs éventuelles (§ 2.2) un fichier directement utilisable en FA.

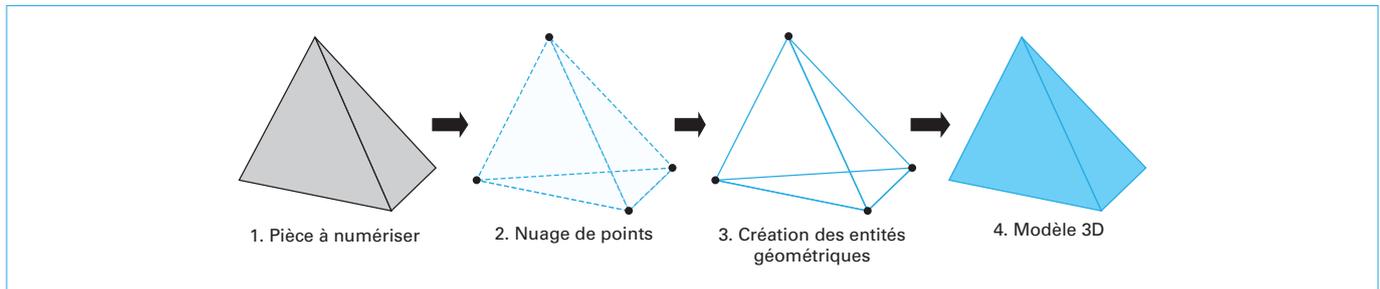


Figure 11 – Illustration du processus de *reverse engineering*

La qualité de la maquette numérique créée par cette méthode est dépendante de la qualité du système d'acquisition de formes tridimensionnelles, et de la compétence de l'opérateur qui reconstruit la surface. On distingue deux grandes familles dans les procédés de *reverse engineering* : avec ou sans contact. Leur choix nécessite de s'intéresser à des paramètres importants, parmi lesquels :

- la résolution à travers l'espacement des points mesurés dans une direction donnée ;
- la précision, c'est-à-dire l'erreur maximale entre la position mesurée d'un point et sa position exacte ;
- la répétabilité à travers la mesure de la dispersion de la position d'un point pour un protocole de mesure donné ;
- la rapidité de mesure ou la capacité à mesurer toutes les caractéristiques d'un point en un temps donné ;
- la rapidité d'acquisition qui est le temps nécessaire pour obtenir une information exploitable. La nuance qui existe donc entre rapidité de mesure et rapidité d'acquisition provient du temps nécessaire au traitement des informations, en particulier dans le cas d'une acquisition en plusieurs prises ;
- le nombre de degrés de liberté ou le nombre minimal d'axes de déplacements relatifs entre le capteur et l'objet qui sont nécessaires à l'acquisition des points ;
- le volume de travail du capteur qui est le volume maximal admissible de l'objet à numériser.

À l'issue du travail de CAO ou de *reverse engineering*, le fichier créé va devoir être converti et contrôlé afin d'être utilisable pour la fabrication.

2.2 Conversion et contrôle des données

Le fichier STL (*StereoLithography*) est le standard pour le transfert des données CAO vers les machines de FA. Il est indépendant du logiciel de CAO utilisé et sert de descripteur très simple des géométries des pièces grâce à une approximation des surfaces enveloppes à l'aide d'un ensemble de triangles (ou facettes) et de leurs normales. Ces éléments sont obtenus par une opération de facettisation appelée **tessellation**.

La création du fichier STL nécessite que la modélisation surfacique soit optimale. Les surfaces doivent être parfaitement fermées et orientées. Si ces deux conditions ne sont pas remplies, le fichier STL sera de mauvaise qualité, voire inexploitable ultérieurement par la machine. Pour pallier ce problème, une étape de contrôle des fichiers avec des logiciels adaptés tels que Magics®, NetFabb® ou Meshlab est nécessaire.

Les erreurs fréquemment détectées et nécessitant des corrections de fichier sont les suivantes (figure 12) :

a. facettisation insuffisante. Elle est généralement due à un paramètre de maille trop grand (utilisation du paramètre par défaut du logiciel CAO ou choix du paramètre inapproprié). Il en résulte une approximation de la surface initiale importante caractérisée par l'erreur de corde « d » représentant la distance

maximum séparant la facette de l'élément de surface qu'elle représente. Cette erreur peut être minimisée par l'augmentation du nombre de facettes. Attention toutefois, une triangulation plus fine peut également être gênante car les fichiers STL générés nécessiteront des temps de calcul importants ;

b. inversion des normales. Le sens de la normale au triangle permet de connaître la position de la matière, lorsque celui-ci est inversé, il y a donc confusion sur le sens matière ;

c. absence de facettes. Il s'agit d'un trou dans le maillage ;

d. présence d'éléments non *manifold*. Il s'agit de triangles écrasés ou superposés.

La principale limite du fichier STL est la pauvreté des informations qu'il contient : l'historique de construction et les données de description (couleur, matériau...) du modèle CAO ne sont pas conservés. C'est pourquoi, pour répondre à ces limites, de nouveaux formats de fichier ont vu le jour parmi lesquels :

- le format .VRML (ou .WRL) est utilisé pour les technologies FA capables d'imprimer en couleur ;

- le format .AMF (*Additive Manufacturing file Format*), introduit en 2013 dans le cadre de la norme NF ISO/ASTM 52915 [9] est amené à supplanter à plus ou moins long terme le STL du fait de sa richesse informationnelle : prise en compte de la géométrie mais aussi des matériaux, des textures, des couleurs, des nuances fonctionnelles et des procédés de réalisation. À ce jour, quelques logiciels de CAO proposent ce type de format (Catia®, Solidworks®, SpaceClaim®).

2.3 Préparation de la production et fabrication

Une fois que le fichier STL a été contrôlé, il est nécessaire de définir la stratégie de fabrication qui sera retenue pour réaliser la pièce. Les paramètres à prendre en compte dans cette stratégie sont :

- l'orientation de la pièce, c'est-à-dire la définition de la direction de fabrication. Cette opération est très importante, car les pièces construites en FA présentent le plus souvent une anisotropie dans le sens de la fabrication ;

- la mise en plateau, c'est-à-dire le placement des pièces ;

- la mise en place, pour les procédés concernés, des supports. Ces derniers jouent le rôle d'échafaudage et sont fabriqués en même temps que la pièce. Ils empêchent son effondrement ou sa déformation sous son propre poids en cas de porte-à-faux trop important.

Lorsque ces différents paramètres ont été fixés, le tranchage des fichiers STL est réalisé. Le tranchage doit prendre en compte l'épaisseur de couche et la résolution de la machine. Ce sont ces strates qui vont être utilisées pour générer les trajectoires machines.

Une fois que l'ensemble des paramètres a été fixé, la production des pièces peut être lancée, suivie ensuite du post-traitement.

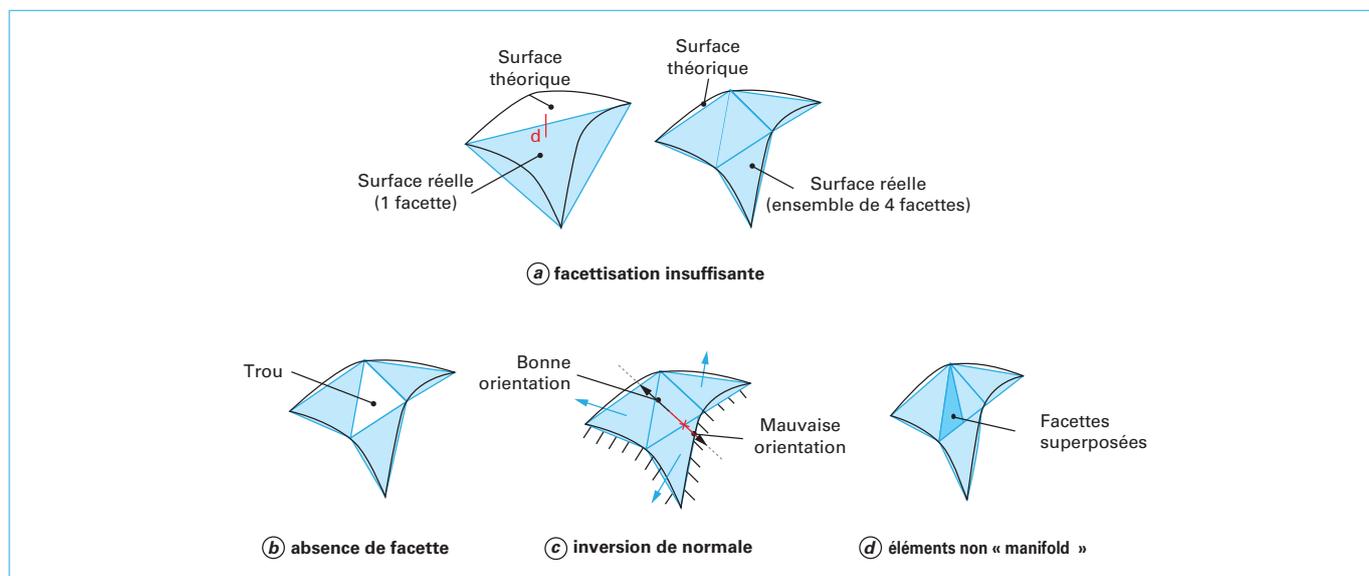


Figure 12 - Erreurs courantes des STL

2.4 Post-traitement

Les décisions prises lors des trois étapes précédentes (création d'un modèle numérique 3D, conversion et contrôle des données, préparation de la fabrication et fabrication) ont des conséquences lourdes sur le cycle de post-traitement des pièces fabriquées en FA (nombre d'opérations et durée de chaque opération). Parmi les opérations pouvant être menées lors du post-traitement, citons :

- l'enlèvement des supports pour les procédés concernés ;
- l'imprégnation des pièces poreuses ;
- les traitements thermiques de détensionnement permettant une relaxation des contraintes résiduelles pour les pièces métalliques ;
- les traitements de densification (de type compression isostatique à chaud HIP) appliqués pour augmenter la densité des pièces ;
- les traitements de surfaces et de super finition réalisés manuellement ou automatiquement, liés à l'existence d'un effet escalier inhérent au processus de fabrication par couche.

3. Triptyque matériaux/ procédés/machines en Fabrication Additive

3.1 Matériaux

Avant même de s'intéresser aux procédés, il est important d'étudier la dimension matériau en FA. Aujourd'hui, les quatre familles de matériaux sont représentées : métaux, polymères, céramiques, composites. Toutefois, les deux familles les plus utilisées sont les polymères (thermoplastiques, résines thermodurcissables...) avec 80 % des volumes vendus et les métaux (aluminium, aciers, nickel, titane...). Ces chiffres seront amenés à évoluer ces prochaines années du fait de l'intérêt croissant des industriels pour la FAD, notamment pour les pièces métalliques.

Cependant, même si la gamme proposée ne cesse de croître, elle demeure limitée par rapport au panel des matériaux accessibles pour les procédés traditionnels. De plus, ces matériaux doivent être disponibles à l'état liquide, pulvérulent ou solide (sous forme de filament) en fonction du type de procédé auxquels ils sont destinés.

Le coût d'achat matière est un facteur non négligeable dans le prix de revient d'une pièce fabriquée en FA. Les paramètres influents sont la pureté du matériau, sa granulométrie ainsi que la nuance de matériau désirée.

À titre d'**exemple**, un kilo de PLA en filament destiné à des imprimantes 3D grand public coûte quelques euros contre 200 à 600 € pour des alliages de titane en poudre.

Cependant, bien qu'une concurrence commence à apparaître, il n'est pas rare que les matériaux utilisables sur une machine soient vendus uniquement par le fabricant de cette machine. Enfin, certains matériaux impliquent des précautions d'usage :

- limitation de l'exposition à l'air pour éviter l'oxydation des alliages de titane ou d'aluminium (travail sous vide ou sous atmosphère neutre) ;
- recyclage limité voire impossible (résines photopolymères) ;
- poudres certifiées pour un usage précis (biomédicale, alimentaire etc.) avec une multiplication du coût associé.

Enfin un dernier point à mettre en avant est la sensibilisation des opérateurs machine aux risques pour la santé lors de la manipulation de poudre dont la granulométrie est très faible (quelques dizaines de micromètres).

3.2 Procédés

Historiquement, différentes classifications des procédés ont été développées. Celles-ci n'offraient qu'une vision matériau alors même que la gamme des matériaux disponibles ne cesse de s'étendre. Ainsi, pour clarifier les dénominations employées, une classification a été mise en place dans le cadre de la norme NF ISO 17296-2 [10]. Elle est fondée sur un regroupement, au sein d'une même catégorie, de procédés qui utilisent une architecture de machine identique et pour lesquels les mécanismes physiques

de transformation des matériaux sont similaires. Cette classification permet ainsi « de discuter d'une catégorie de machines plutôt que de s'intéresser aux variations commerciales des technologies » [8]. On trouve dans cette classification sept catégories de procédés FA.

3.2.1 Photopolymérisation en cuve

Pour ce procédé, une résine photosensible liquide contenue dans une cuve est durcie par polymérisation grâce à l'action d'une source lumineuse (figure 13 et [12]). Lorsqu'une couche de résine est polymérisée, le plateau de construction est déplacé verticalement (axe Z) d'une distance fixée par les paramètres de production afin de réitérer le cycle.

Les variantes de ce procédé ont pour origine la nature de la source lumineuse qui peut être soit un laser, soit une lampe UV, et le sens de déplacement du plateau.

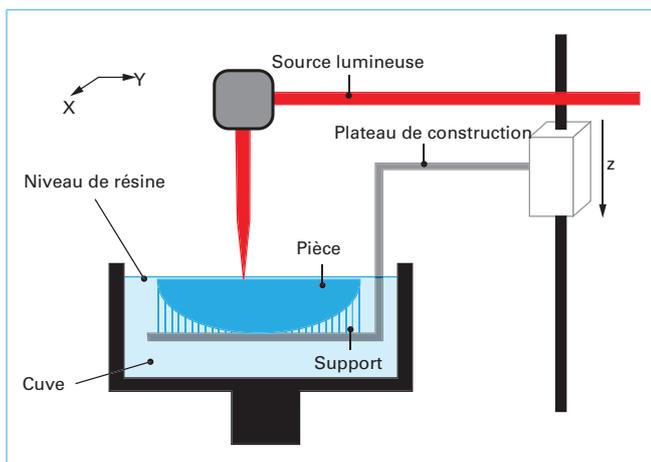


Figure 13 – Illustration du procédé de photopolymérisation en cuve, adapté de Rias [12]

La polymérisation obtenue à l'aide d'un laser correspond au premier brevet déposé relatif à la FA [11] et au premier procédé commercialisé. Il est plus connu sous le nom de **stéréolithographie**. La source lumineuse est ici ponctuelle et la création d'une couche est obtenue par balayage de la surface.

La deuxième variante repose sur l'utilisation d'un rayonnement lumineux obtenu par des lampes UV. Dans ce cas, la polymérisation s'effectue simultanément sur l'ensemble de la surface exposée.

La dernière variante, apparue récemment, est dénommée **CLIP** (*Continuous Liquid Interface Production*). Elle repose sur l'action combinée d'une lampe UV pour générer la polymérisation et de l'oxygène pour protéger les zones qui ne doivent pas être solidifiées sur la couche. Contrairement aux deux technologies précédentes, le plateau est ici déplacé vers le haut et permet ainsi une fabrication continue.

L'inconvénient majeur de ce procédé, malgré une bonne précision (quelques dizaines de microns) et la qualité des surfaces obtenues, réside dans la matière première utilisée : variétés de résines limitées, propriétés des résines inférieures à celles des polymères techniques (ne pouvant pas convenir aux prototypes fonctionnels) et vieillissement pouvant rendre les pièces cassantes dans le temps.

3.2.2 Projection de matière

Ce procédé fonctionne sur le principe des imprimantes à jet d'encre. Il utilise des têtes d'impression qui viennent déposer des gouttelettes de matière à la surface de la zone de fabrication. Deux types de matériaux sont utilisables :

- les résines photosensibles qui, une fois déposées, sont polymérisées par la source lumineuse solidaire de la tête d'impression (figure 14 et [12]) ;
- les cires déposées à l'état liquide et qui, en refroidissant, vont constituer la pièce.

Le principal avantage de ce procédé est la possibilité de réaliser des pièces multi-matériaux et d'introduire la couleur. D'autre part, sa large gamme de matériaux (environ 60) permet d'obtenir des prototypes permettant de simuler le comportement des pièces en polymères techniques ou standards obtenus par injection lors des tests fonctionnels.

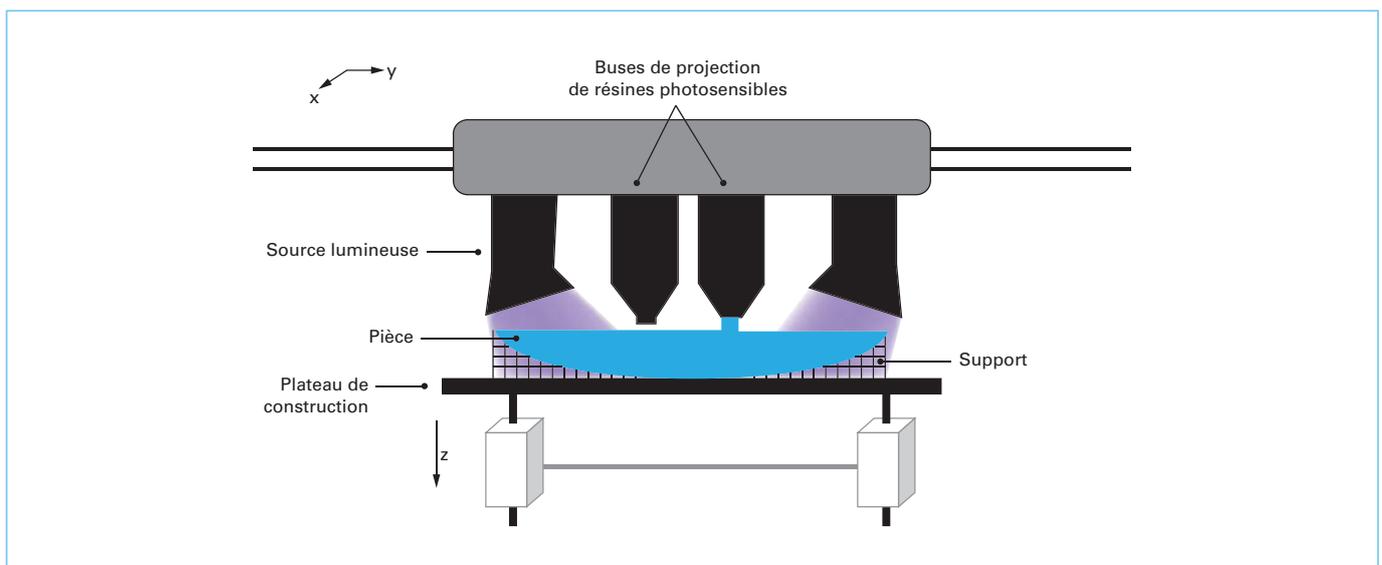


Figure 14 – Illustration du procédé de projection de matière (technologie Polyjet), adapté de Rias [12]

3.2.3 Projection de liant

Ce procédé, très proche du procédé par projection de matière, est apparu en 1993 au Massachusetts Institute of Technology sous l'appellation **3D Printing (3DP)**. Tout comme la projection de matière, il repose sur l'utilisation de têtes d'impression, celles-ci servant ici à projeter un liant liquide sur un lit de poudre constituant le matériau de construction (figure 15 et [12]). La poudre non liée servira de support à la pièce.

La gamme de matériaux de base compatibles s'étend des polymères aux métaux en passant par les céramiques. La combinaison de gouttes de liant colorées permet de réaliser des produits de couleur. Son principal inconvénient demeure néanmoins la fragilité des pièces obtenues, qui nécessitent généralement un post-traitement (infiltration ou frittage) et une utilisation pour des applications sans contrainte mécanique élevée.

3.2.4 Fusion sur lit de poudre

Le principe de la fusion sur lit de poudre est de faire fondre à l'aide d'une énergie thermique une fine couche de poudre préalablement étalée par un rouleau sur un plateau de fabrication (figure 16 et [12]). Il implique que l'atmosphère protectrice de la chambre de fabrication soit contrôlée.

Remarque : la distinction qui existe entre fusion et frittage correspond à la quantité d'énergie apportée. En frittage, la poudre est chauffée sans atteindre sa température de fusion. Les grains de poudre se soudent alors entre eux ce qui permet de constituer la strate.

On retiendra trois catégories principales à l'intérieur de ce procédé :

- le frittage de poudres polymères (thermoplastiques) par laser utilise des lasers CO₂ d'une puissance de quelques dizaines de Watt. Les premiers brevets protégeant cette technologie sont tombés dans le domaine public en février 2014 ;

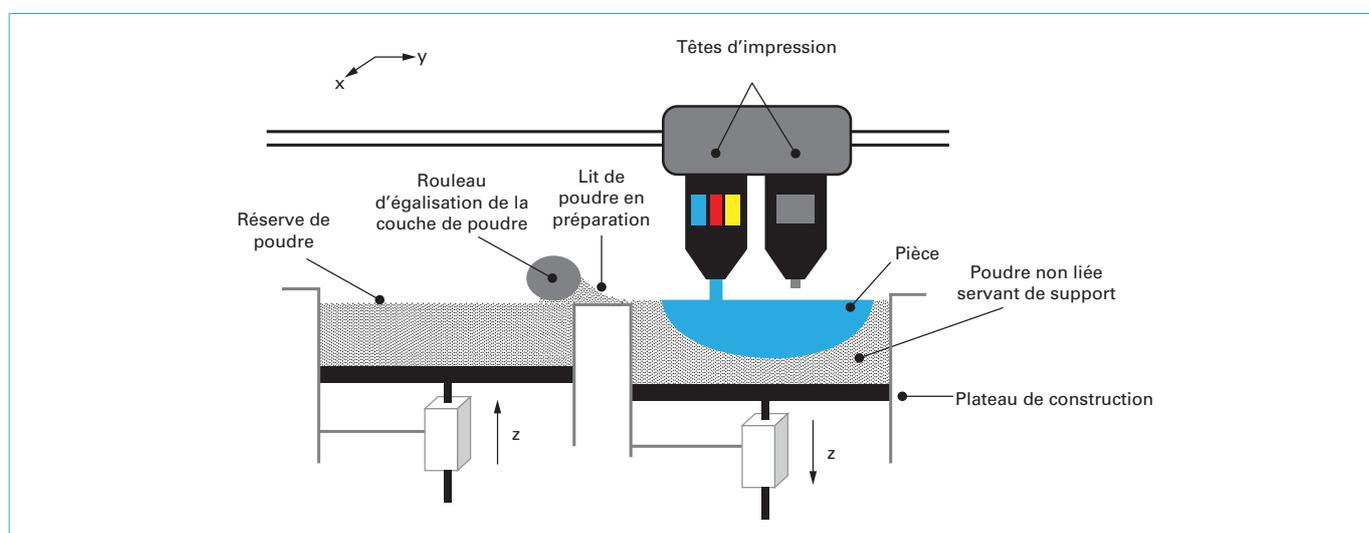


Figure 15 - Illustration du procédé de projection de liant, adapté de Rias [12]

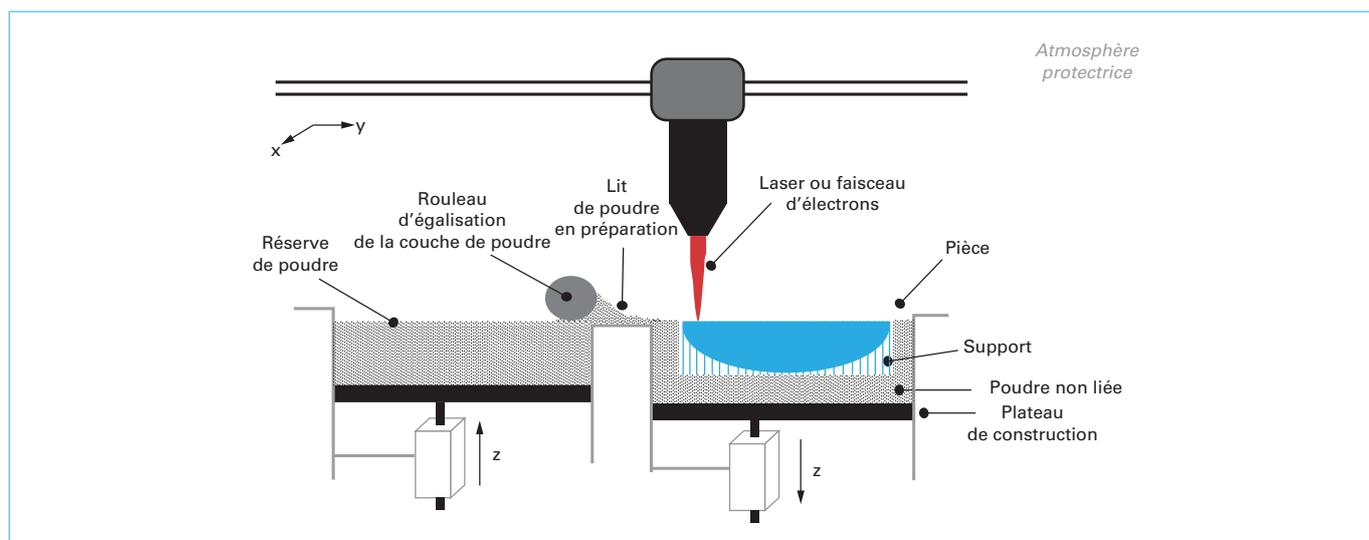


Figure 16 - Illustration du procédé de fusion sur lit de poudre, adapté de Rias [12]

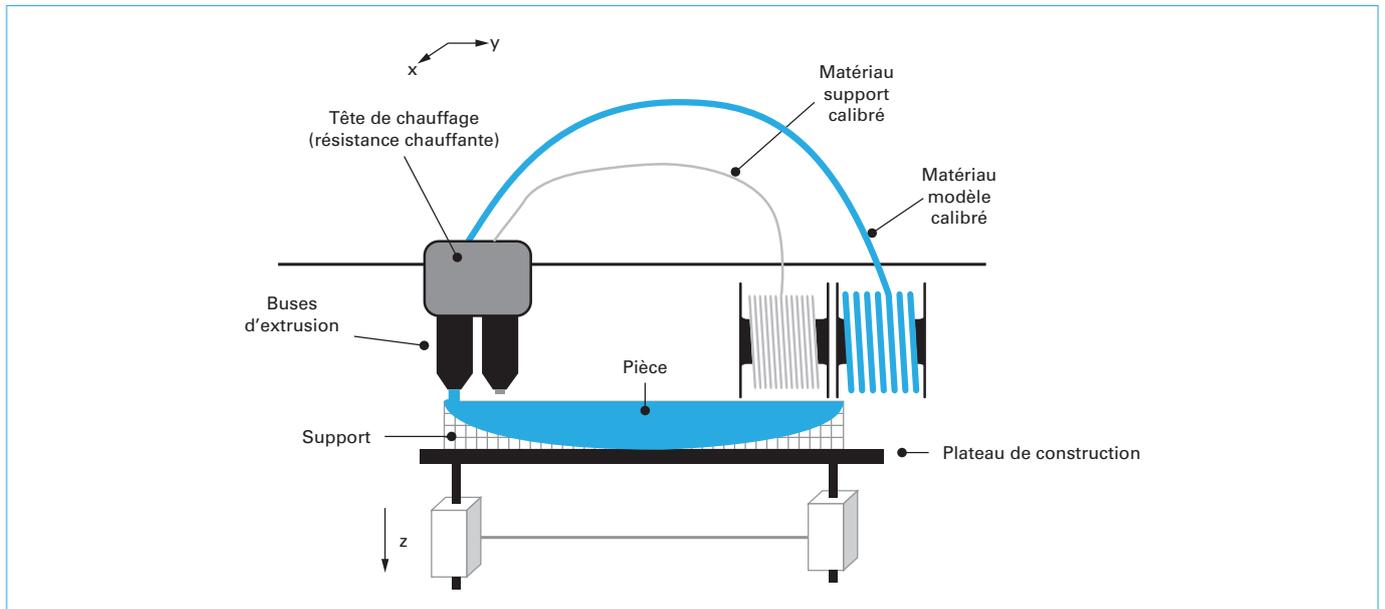


Figure 17 – Illustration du procédé d'extrusion de matière – Cas d'une machine à deux buses, adapté de Rias [12]

- la fusion de poudre métallique par laser utilise des lasers YAG de 100 W à 1 kW. Les épaisseurs de couches sont de l'ordre de quelques dizaines de microns (de 20 à 100 μm selon les constructeurs) ;

- la fusion de poudre métallique par faisceau d'électrons est, quant à elle, limitée aux matériaux conducteurs. Il est, dans ce cas, nécessaire de préchauffer le lit de poudre pour limiter les gradients thermiques et donc les contraintes résiduelles. Toutefois, les états de surface des pièces sont moins bons car le faisceau d'électron est plus large que celui d'un laser.

3.2.5 Extrusion de matière

Le principe de ce procédé repose sur le chauffage d'un matériau au-dessus de sa température de fusion, puis sur son extrusion au travers d'une filière (ou buse) se déplaçant dans un plan horizontal. La solidification de la matière sur la couche précédente est quasi immédiate.

L'extrusion de matière a d'abord été appliquée aux matériaux polymères thermoplastiques (procédé *Fused Deposition Modeling* – FDM) et est à l'origine de la création de la société Stratasys® aujourd'hui leader du marché. De nombreuses évolutions sont apparues ces dernières années :

- expiration des premiers brevets protégeant le FDM et favorisant le développement des machines *open source* inspirées du projet RepRap [13] ;

- élargissement de la gamme de matériaux conduisant notamment à l'apparition du *bioprinting* (fabrication d'un tissu biologique à partir de cellules vivantes) ou à une utilisation dans l'industrie alimentaire ;

- multiplication du nombre de buses. Dans le cas des machines à deux buses, l'une peut être utilisée pour déposer le matériau de base tandis que l'autre sert pour le matériau support, moins cher et se détachant de la pièce sans détériorer la surface (figure 17 et [12]) ; ou bien pour la fabrication de pièces avec deux matériaux différents sans support.

3.2.6 Dépôt de matière sous énergie concentrée

Ce procédé est issu des techniques de revêtement laser. Son principe repose sur la fusion d'une surface à l'aide d'une source d'énergie et sur l'apport simultané d'un jet de poudre ou d'un filament de matière dans cette zone en fusion, le tout en présence d'un gaz protecteur (figure 18 et [12]). Les supports ne sont pas nécessaires car le plateau de construction est déplacé suivant cinq axes à l'image de ce que l'on peut trouver sur les centres d'usinage. Il permet de réaliser des matériaux à gradients de propriétés. La précision des pièces obtenue est plus faible que celle obtenue avec les procédés de fusion sur lit de poudre. L'épaisseur de couche est de l'ordre de 500 μm .

Aujourd'hui, ce procédé n'est développé que pour des poudres métalliques.

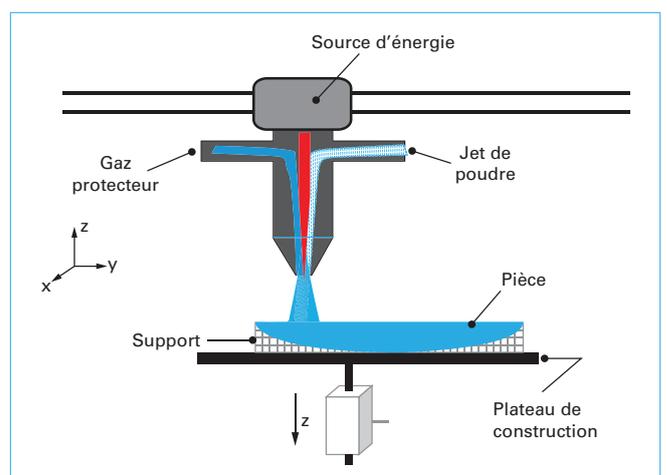


Figure 18 – Illustration du procédé de dépôt de matière sous énergie concentrée, adapté de Rias [12]

3.2.7 Stratification de couches

La stratification de couches (figure 19 et [12]) est un procédé combinant l'addition et la soustraction de matière : des feuilles ou plaques de matériau sont découpées à l'aide d'un système de découpe (laser, outil coupant, ultrasons...), empilées, puis reliées entre elles (mise en position, collage, soudage ultrason, éventuellement utilisation d'inserts...) afin de former le produit.

Tous les matériaux existants sous forme de plaques peuvent être utilisés.

3.2.8 Synthèse

La figure 20 ci-dessous présente les usages courants en industrie au cours du processus de développement d'un produit des sept procédés définis par la norme NF ISO 17296-2, ainsi que leurs perspectives d'évolution dans les prochaines années.

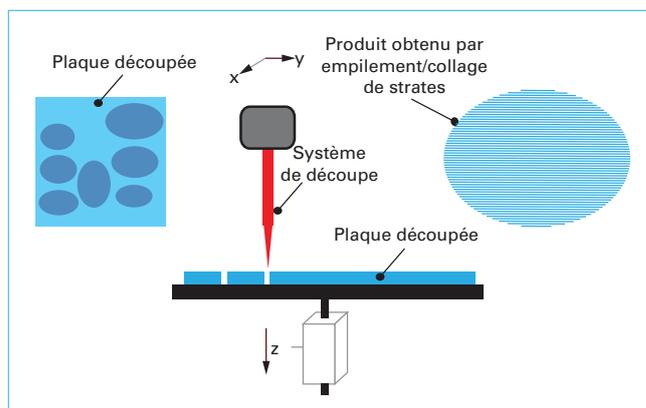


Figure 19 – Illustration du procédé de stratification de couches, adapté de Rias [12]

3.3 Machines pour la FA

La gamme des machines de FA actuellement disponible sur le marché augmente rapidement. La figure 21 présente la répartition du chiffre d'affaires des ventes de machines selon les secteurs d'utilisation, toutes catégories confondues pour l'année 2014 [14].

Cependant seules deux catégories indépendantes des procédés existent : les machines dites de bureau et les machines industrielles.

3.3.1 Machines de bureau

Selon le cabinet Wohlers, il s'est vendu environ 140 000 machines de ce type en 2014, un chiffre multiplié par deux en un an. On peut distinguer deux usages distincts : les machines de bureau grand public et les machines de bureau professionnelles.

Les machines de bureau grand public, dont le prix d'achat inférieur à 5 000 \$ (4 600 €), ont permis d'introduire la FA chez les particuliers et dans la communauté des « makers » dans le cadre des FabLab (ateliers collaboratifs). Une simple table peut suffire pour leur installation, et leur prise en main ne requiert pas de compétence spécifique. Ce marché des machines grand public s'est largement démocratisé ces dernières années avec les

machines *open source*. Cet engouement a ainsi favorisé une baisse rapide des prix, certaines machines se vendant moins de 300 \$ (250 €). Cependant la gamme de matériaux disponibles est limitée aux thermoplastiques (PLA et ABS essentiellement), la qualité des pièces obtenues est médiocre et les volumes de fabrication sont restreints (environ $150 \times 150 \times 200 \text{ mm}^3$), cantonnant leur usage à la fabrication de prototypes de faible qualité ou à la modélisation de concepts.

Les machines de bureau professionnelles sont une alternative aux machines grand public. Leurs performances (vitesse, précision...) et leurs caractéristiques (volume de fabrication, nuisances sonores...) sont meilleures mais leur prix d'achat est de ce fait plus élevé, de l'ordre de 5 à 50 k€. Elles sont utilisées par les industriels qui souhaitent réaliser leurs prototypes en interne sans passer par la sous-traitance, garantissant ainsi la confidentialité des produits en cours de développement et permettant une mise à disposition des prototypes dans des délais réduits.

Aux vues des évolutions actuelles, la frontière entre les machines grand public et les machines de bureau a tendance à devenir de plus en plus poreuse.

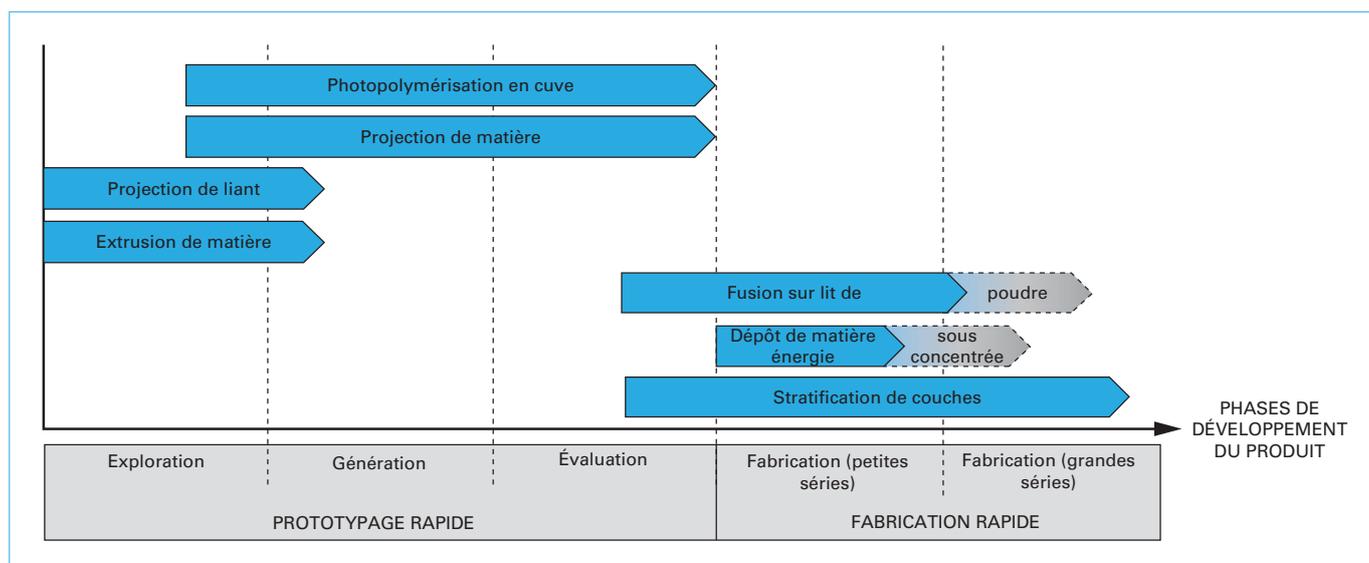


Figure 20 – Usages des procédés FA

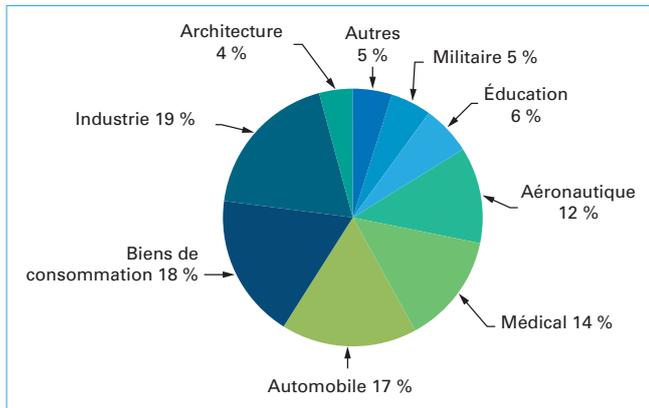


Figure 21 – Secteurs d'utilisation des machines de FA

3.3.2 Machines industrielles

En 2014, 12 850 machines industrielles ont été vendues dans le monde contre 7 800 en 2012. Elles sont à la fois destinées à la fabrication de prototypes fonctionnels mais aussi et surtout à la FAD. Leur utilisation nécessite un environnement spécifique reposant sur un personnel qualifié et sensibilisé aux spécificités de la chaîne numérique liée à la FA. De plus, la production de pièces avec ces machines implique la mise en place dans les entreprises d'un système d'assurance qualité destiné notamment à la certification des produits.

Le prix d'achat des machines industrielles est élevé : de 5 à 200 k€ pour une machine dédiée aux polymères, et de 500 k€ à 2 M€ pour une machine destinée à la fabrication de pièces métalliques. Cette différence de prix s'explique par la nécessité d'une conception robuste garantissant aux industriels des taux d'utilisation élevés mais également par de grandes vitesses de réalisation et des volumes de fabrication importants. Enfin, contrairement aux machines de bureau, la gamme de matériaux disponible est plus large.

4. Évolutions liées à la Fabrication Additive

4.1 Processus de conception

Dans le domaine de la FA qui est en constante évolution, il n'est pas rare de constater que les concepteurs se sentent démunis. L'apparition de la FA est en effet venue bouleverser un processus de conception fondé jusqu'ici uniquement sur les procédés traditionnels.

On comprend donc toute l'importance de promouvoir les potentialités de la FA auprès des concepteurs afin qu'ils en tirent pleinement profit lors de la conception et de façon plus large dans un objectif d'innovation produit. Cela implique de mettre à leur disposition des outils et des méthodes adaptés aux spécificités de la FA et permettant une modification des habitudes de conception actuelles : c'est l'enjeu du *Design For Additive Manufacturing* (DFAM) ou conception pour la FA.

Cette approche DFAM fait actuellement l'objet de travaux de recherche et développement et repose sur la mise en place d'éléments destinés à faciliter le travail du concepteur tels que :

- les méthodes de sélection multicritères des procédés de FA ;
- les bases de règles ou de faits permettant la prise en compte des limites des procédés (par exemple, épaisseur de paroi minimale réalisable, orientation optimale en fonction des sollicitations...);
- les outils facilitant la création de formes et permettant de faire abstraction de formes *a priori* liées aux méthodes de conception

traditionnelle. Des outils reposant sur des méthodes mathématiques et permettant l'optimisation topologique ont été développés par des éditeurs de logiciels comme Inspire® de SolidThinking® ;

- les outils de simulation des procédés FA destinés à optimiser les trajectoires de balayage ;
- les outils de prédiction des comportements mécaniques des pièces ;
- les méthodologies destinées à favoriser le développement de produits innovants [15].

4.2 Émergence d'un nouvel écosystème

Un nouvel écosystème est apparu suite au développement de la FA : la **production à la demande**. Il est aujourd'hui possible, grâce à la croissance de l'*open design*, de choisir dans des bases de données en ligne le fichier CAO d'une pièce, d'y apporter les modifications souhaitées, puis de la fabriquer avec sa propre machine ou en la sous-traitant à des fournisseurs de services (tels que Shapeways ou Sculpteo®) qui se chargeront de sa fabrication. Le rapport Wohlers 2014 [16] estime à plus de 250 le nombre des sociétés qui interviennent actuellement sur ce marché.

Cependant, ces changements soulèvent la question de la propriété industrielle des produits qui peuvent être désormais si facilement reproduits ou copiés. C'est pourquoi une réglementation définissant plus précisément les contours de cet écosystème est actuellement envisagée, mais celle-ci irait alors à l'encontre du principe de libre accès aux données qui en est le moteur. L'INPI fournit également des recommandations à ce sujet [17].

L'essor de la FA a également contribué au développement des FabLab, lieux de rencontre entre les activités personnelles liées aux loisirs et au bricolage et les activités de création associées aux startups. Là encore on retrouve la notion de mutualisation. Ce sont ici les moyens et les compétences qui sont mis à la disposition d'une communauté et non plus de simples fichiers numériques. La FA revêt alors un rôle social qui devient notable dans le développement de ces communautés.

5. Conclusion

Les récentes évolutions des technologies de FA soulignent le fort dynamisme de ce secteur. Ces avancées, tant au niveau des matériaux que des formes ou de la complexité réalisables, laissent entrevoir des usages innovants des procédés. Ainsi, si les applications actuelles restent principalement dédiées aux productions sur mesure (implants, chirurgie, etc.) ou à forte valeur ajoutée (aéronautique, défense, Formule 1, etc.), la démocratisation de ces technologies va, dans un avenir proche, impacter de nombreux domaines tant sur le plan technologique que sur le plan social. Si les contraintes principales pour la diffusion massive de certains de ces procédés restent encore une taille de pièce restreinte et des coûts machine et/ou matière élevés (en particulier pour les produits métalliques), il est fort probable qu'une fois ces verrous levés, le potentiel d'innovation lié à ces technologies pourra se révéler par leur adoption massive.

6. Glossaire

Prototypage Rapide (*Rapid Prototyping*)

Usage de la fabrication additive permettant d'aboutir à des représentations intermédiaires de la conception de produits tels que les concepts ou les prototypes fonctionnels.

Fabrication Rapide (*Rapid Manufacturing*)

Usage de la fabrication additive destiné à l'élaboration de produits ou outillages finis et fonctionnels.

Sigles, notations et symboles	
Symbole	Description
ABS	Acrylonitrile Butadiène Styrène
DFAM	<i>Design For Additive Manufacturing /</i> Conception pour la fabrication additive
FA	Fabrication Additive
FAD	Fabrication Additive Directe

Sigles, notations et symboles (suite)	
Symbole	Description
OR	Outillage Rapide
PR	Prototypage Rapide
PLA	<i>PolyLactic Acid /</i> Acide PolyLactique
STL	<i>Stereolithography</i>

Fabrication additive

Principes généraux

par **Floriane LAVERNE**

Professeur agrégé
Laboratoire de conception de produits et innovation (LCPI),
Arts et métiers ParisTech, Paris, France

Frédéric SEGONDS

Maître de conférences
Laboratoire de conception de produits et innovation (LCPI),
Arts et métiers ParisTech, Paris, France

et **Patrice DUBOIS**

Maître de conférences
Laboratoire de conception de produits et innovation (LCPI),
Arts et métiers ParisTech, Paris, France

Sources bibliographiques

- [1] AFNOR. – *NF E67-001 : Fabrication additive – vocabulaire*. Éd, p. 4 (2011).
- [2] BOURELL (D.L.), LEU (M.C.) et ROSEN (D.W.). – *Roadmap for additive manufacturing – identifying the future of freeform processing*. The University of Texas at Austin (2009).
- [3] GIBSON (I.), ROSEN (D.R.) et STUCKER (B.). – *Additive manufacturing technologies*. 2nd edition New York : Springer US (2015).
- [4] MURR (L.E.), GAYTAN (S.M.), MARTINEZ (E.), MEDINA (F.R.) et WICKER (R.B.). – *Fabricating functional Ti-Alloy biomedical implants by additive manufacturing using electron beam melting*. Journal of Biotechnology and Biomaterial, vol. 2 (2012).
- [5] YAMANOUCHI (M.), HIRAI (T.) et SHIOTA (I.). – *Overall view of the P/M fabrication of functionally gradient materials*. In First International Symposium on Functionally Gradient Materials, Sendai, Japan, p. 59-64 (1990).
- [6] HULL (C.W.). – *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*. US Patent US 457330 A (1986).
- [7] BEAMAN (J.J.), ATWOOD (C.), BERGMAN (T.L.), BOURELL (D.), HOLLISTER (S.) et ROSEN (D.). – *Additive/subtractive manufacturing research and development in Europe*. DTIC Document (2004).
- [8] WOHLERS (T.T.). – *Wohlers report 2013 : additive manufacturing and 3D printing state of the industry : annual worldwide progress report*. Wohlers Associates, Inc. (2013).
- [9] AFNOR. – *NF ISO/ASTM 52915 : Spécification normalisée pour le format de fichier pour la fabrication additive (AMF)*. Version 1.1, p. 31, 10 août 2013.
- [10] AFNOR. – *NF ISO 17296-2 : Fabrication additive – Principes généraux – Partie 2 : vue d'ensemble des catégories de procédés et des matières de base*. p. 16, 13 juin 2015.
- [11] ANDRÉ (J.-C.), LE MEHAUTÉ (A.) et DE WITTEE (O.). – *Dispositif pour réaliser un modèle de pièce industrielle*. France Patent FR2-567 668 (1984).
- [12] RIAS (A.L.). – *Optimisation de la conception pour la fabrication additive, par le design et son intégration numérique*. Thèse de doctorat, LCPI, Arts et Métiers ParisTech (2017).
- [13] JONES (R.), HAUFE (P.), SELLS (E.), IRAVANI (P.), OLLIVER (V.) et PALMER (C.) et al.. – *RepRap – The replicating rapid prototyper*. Robotica, vol. 29, p. 177-191 (2011).
- [14] COTTELEER (M.J.). – *3D opportunity : additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth*. Presented at the Symposium Additive Manufacturing (SIMT) (2014).
- [15] LAVERNE (F.), SEGONDS (F.), ANWER (N.) et LE COQ (M.). – *Assembly-based methods to support product innovation in design for additive manufacturing : an exploratory case study*. ASME Journal of Mechanical Design, p. 9 (2015).
- [16] WOHLERS (T.T.). – *Wohlers report 2014 : 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report*. (2014).
- [17] GHILASSENE (F.). – *L'impression 3D-Impacts économiques et enjeux juridiques*. Les Dossiers de la Direction des Études de l'INPI, Dossier n° 2014-04, Paris (2014).

À lire également dans nos bases

REMY (S.), LAROCHE (F.) et BERNARD (A.). – *Nu-mérisation 3D et prototypage rapide – Exemples d'industrialisation de produits – Incontournables de la numérisation 3D et du prototypage rapide*. [AG 3 404], 10 janv. 2011.

MILLET (Y.). – *Fabrication de poudres métalliques par la méthode PREP® – Conclusion*. [IN 221], 10 janv. 2015.

PILLOT (S.). – *Fusion laser sélective de lit de poudres métalliques*. [BM 7 900] (2016).

Annuaire

Constructeurs – Fournisseurs – Distributeurs
(liste non exhaustive)

Arcam
<http://www.arcam.com/>

BeAM
<http://www.beam-machines.fr/>

CMET
<http://www.cmet.co.jp/eng/>

FABRICATION ADDITIVE

Concept laser
<http://www.concept-laser.de/en/home.html>

EOS
<http://www.eos.info/en>

ExOne
<http://www.exone.com/>

Optomec
<http://www.optomec.com/>

Renishaw
<http://www.renishaw.com/en/additive-manufacturing-systems--15239>

SLM Solution
http://www.stage.slm-solutions.com/index.php?index_en

Stratasys
<http://www.stratasys.com/>

Voxeljet
<http://www.voxeljet.de/en/>

3D Systems
<http://www.3dsystems.com/>

Organismes – Fédérations – Associations (liste non exhaustive)

Association Française de Prototypage Rapide (AFPR)
www.afpr.asso.fr

Global Alliance for Rapid Prototyping Associations (GARPA)
garpa.org

Laboratoires – Bureaux d'études – Écoles – Centres de recherche (liste non exhaustive)

Arts et Métiers ParisTech (ENSAM), LCPI

Universités de technologie

École centrale de Nantes

Institut de formation aux techniques supérieures

École des mines de Nancy

École normale supérieure de Cachan

Normes et standards

NF E 67-001	2011	Fabrication additive. Vocabulaire	NF ISO 17296-2	2015	Fabrication additive. Principes généraux. Partie 2 : Vue d'ensemble des catégories de procédés et des matières de base
NF ISO/ASTM 52915	2013	Spécification normalisée pour le format de fichier pour la fabrication additive (AMF)			

Brevets

HULL (C.W.). – *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*. US Patent US4575330 A (1986).

ANDRÉ (J.-C.), LE MEHAUTÉ (A.), DE WITTEE (O.). – *Dispositif pour réaliser un modèle de pièce industrielle*. France Patent FR2-567 668 (1984).



**TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR**

L'expertise technique et scientifique de référence

Techniques de l'Ingénieur vous apporte une information précise et fiable pour l'étude et la réalisation de vos projets.

Actualisées en permanence, les **ressources documentaires** profitent aujourd'hui à plus de **300 000 utilisateurs** et sont la référence pour tout ingénieur, bureau d'études, direction technique et centre de documentation.

Depuis près de 70 ans, **3 500 experts** contribuent quotidiennement à développer, enrichir et mettre à jour cette documentation professionnelle unique en son genre.

L'intégralité de ces ressources représente plus de **9 000 articles**, répartis dans plus de **430 bases documentaires**, accessibles sur internet, en téléchargement PDF, et sur tablette.

4 BONNES RAISONS DE CHOISIR TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

- Une **actualisation permanente** du fonds documentaire
- Un **comité d'experts** scientifiques et techniques reconnus
- Une **collection scientifique et technique incontournable** sur le marché francophone
- L'espace actualité pour suivre les **tendances et innovations** de vos secteurs



DES SERVICES ASSOCIÉS À CHAQUE ABONNEMENT

- **Service de questions-réponses** ⁽¹⁾⁽²⁾ : interrogez les plus grands spécialistes des domaines couverts par vos bases documentaires. Votre abonnement vous permet en effet de poser des questions techniques ou scientifiques.
- **Les articles Découverte** : un article vous intéresse, mais ne fait pas partie de votre abonnement ? Techniques de l'Ingénieur vous offre la possibilité de l'ajouter.
- **Le Dictionnaire technique multilingue** : 45 000 termes scientifiques et techniques – avec illustrations et légendes – en français, anglais, espagnol, allemand.
- **Les Archives** : vos bases documentaires s'enrichissent et sont mises à jour en ligne en permanence. Les Archives conservent la mémoire de ces évolutions et vous permettent d'accéder aux versions antérieures de vos articles, ainsi qu'à ceux qui traitent des technologies plus anciennes.

Profitez également de l'impression à la demande ⁽¹⁾, pour commander une ou plusieurs éditions papier supplémentaires de vos bases documentaires (sur devis).

(1) Disponible pour la France, le Luxembourg, la Belgique, la Suisse et Monaco.

(2) Non disponible pour les établissements scolaires, écoles, universités et autres organismes de formation.

ILS NOUS FONT CONFIANCE :



DÉCOUVREZ les offres de packs !

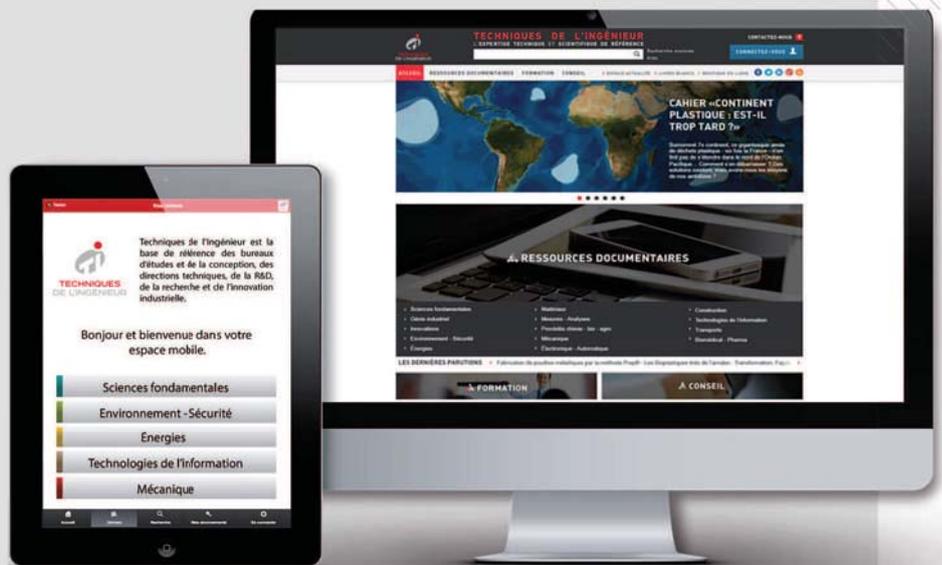
LES + DES OFFRES PACK

- Un large choix de **+ de 60 thématiques** pour des besoins de contenu plus larges
- Des **tarifs préférentiels sur mesure** adaptés à vos besoins

LES UNIVERS DOCUMENTAIRES

- Plus de 430 bases documentaires et plus de 9 000 articles en 14 univers

-  Sciences fondamentales
-  Environnement - Sécurité
-  Énergies
-  Technologies de l'information
-  Mécanique
-  Innovations
-  Génie industriel
-  Biomédical - Pharma
-  Procédés Chimie -Bio - Agro
-  Matériaux
-  Mesures - Analyses
-  Électronique - automatique
-  Construction
-  Transports



POUR EN SAVOIR PLUS SUR LES OFFRES DE PACKS...

... contactez le service Relation Clientèle
qui se chargera de vous rediriger vers un chargé d'affaires :

Tél : +33 (0)1 53 35 20 20

Email : infos.clients@teching.com
www.techniques-ingenieur.fr

LES AVANTAGES **TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR**

Le droit d'accès, annuel ou pluriannuel, permet une consultation illimitée des ressources documentaires sélectionnées, ainsi que le téléchargement des versions PDF des articles de référence ou fiches pratiques inclus dans ces ressources. Les droits d'accès sont proposés en monoposte ou multiposte.

▪ ACTUALISATION PERMANENTE

Mises à jour permanentes, publication de **nouveaux articles** de références et fiches pratique : un contenu complet sur le sujet qui vous intéresse, des alertes par email.

▪ DES SERVICES INCLUS

En plus de l'accès aux ressources documentaires, chaque souscription offre un **accès privilégié** à un **ensemble de services**.

▪ MOBILITÉ



Votre abonnement étant **100 % web**, vous pouvez le consulter à tout moment, sur n'importe quel ordinateur ou sur nos versions **iPad et Android**.



Pour accompagner vos équipes et projets,
CHOISISSEZ

les offres de formation et conseil

MONTEZ EN COMPETENCE

- Des formations personnalisées, réalisées au sein de votre établissement et à vos dates
- Un accompagnement à la mise en conformité réglementaire
- Des missions d'audit et de recommandations techniques

LES ENGAGEMENTS **TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR**

- Un réseau d'experts reconnus pour vous conseiller
- Une veille scientifique et technique pour mieux décider
- Les dernières obligations HSE pour être en règle
- Les clés en management des hommes et des projets pour gagner en efficacité

Consultez l'intégralité
des programmes sur le site
de Techniques de l'Ingénieur,
espaces **FORMATION** et **CONSEIL**

www.techniques-ingenieur.fr



RESSOURCES
DOCUMENTAIRES



FORMATION



CONSEIL