

# Focus sur la fusion de poudre métallique par laser et ses applications

Par Anne-Lise Rias, Frédéric Segonds, Carole Bouchard, LCPI - Arts et Métiers ParisTech Campus de Paris, Stéphane Abed, Poly-Shape SAS

« Ensemble des procédés permettant de fabriquer couche par couche, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique », telle est la définition officielle de la fabrication additive. Trois types d'usage en sont faits. La fusion de poudre par laser est un des procédés qui commence à montrer des capacités adaptées à la fabrication directe, notamment pour des applications industrielles.

**D**epuis les années 2000 et l'introduction des matériaux métalliques, la fusion de poudre par laser est devenue l'un des procédés phare de la fabrication directe. Très récemment, les industries aéronautique, biomédicale ou encore automobile ont ouvert leurs portes à ce procédé. Alors au-delà du prototypage, quelles sont les possibilités aujourd'hui ? Que peut-on en attendre ?

## Une définition normalisée

De nombreuses expressions et abréviations désignent la fabrication additive et ses procédés, en anglais comme en français : « additive manufacturing », « impression 3D », « ALM » et d'autres encore. En 2010, le comité européen UNM 920 (Union de Normalisation de la Mécanique) a proposé puis validé la norme NF E67-001 pour définir l'expression fabrication additive : « Ensemble des procédés permettant de fabriquer couche par couche, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique »<sup>[1]</sup>. Son homologue américain l'ASTM F42 complète en précisant que cette démarche additive, qui dépose de la matière seulement là où elle est nécessaire, s'oppose aux procédés de fabrication dits soustractifs tels que l'usinage ou la forge qui travaillent par enlèvement ou déformation d'un brut initial. Sans outillage ni moule, la fabrication additive donne une grande liberté géométrique pour imaginer des formes

complexes, sur-mesure si nécessaire. Elle permet de produire à la demande à partir d'un modèle 3D numérique.

Les comités distinguent trois types d'usage de la fabrication additive :

**1. Le prototypage rapide** puise ses sources au 19<sup>e</sup> siècle et est entré dans les pratiques courantes au milieu des années 1980 grâce, entre autres au français Jean-Claude André du CNRS et à l'américain Charles Hull. C'est historiquement le premier usage du principe additif et celui qui reste encore largement majoritaire aujourd'hui. Cette technique permet d'obtenir des maquettes d'aspects ou d'ergonomie

et des préséries de faible résistance mécanique et à la durée de vie limitée<sup>[2]</sup>.

**2. L'outillage rapide**, moins courant, désigne la fabrication de moules ou de noyaux pour l'injection ou la fonderie. Les moules peuvent être en sable, en métal ou en céramique<sup>[3]</sup>.

**3. La fabrication rapide (ou directe)** apparaît à partir des années 2000. Bien au-delà du prototypage, il s'agit de produire des pièces ou des sous-ensembles (encore rarement des produits entiers) finis et fonctionnels. Ces pièces sont directement implantées dans le produit ou l'environnement d'usage définitif. *A priori*, tous les procédés additifs permettent de faire de la fabrication directe sous réserve que la pièce finie démontre sa tenue dans le temps et sa résistance face aux contraintes attendues. La fusion de poudre par laser est un des procédés qui commence à montrer des capacités adaptées à la fabrication directe, notamment pour des applications industrielles<sup>[3]</sup>.

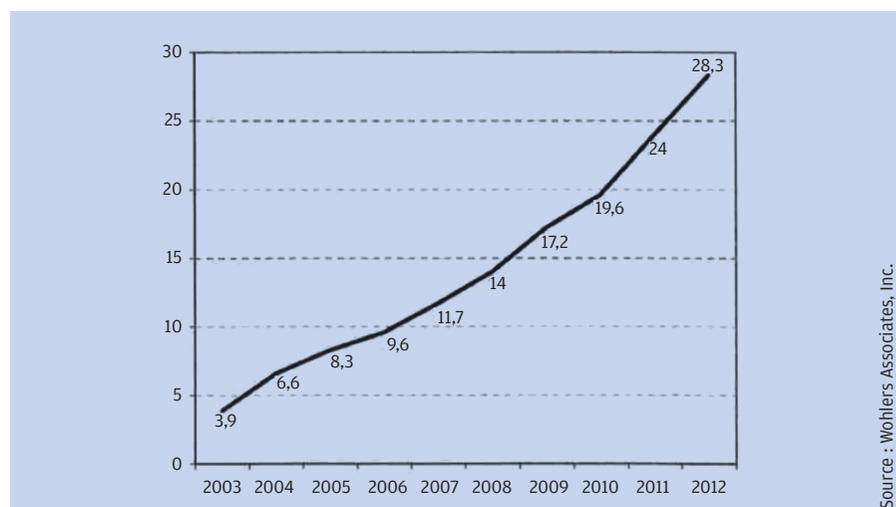


FIGURE 1 : Part de marché de la fabrication directe en pourcentage.

## Principe de la fusion de poudre métallique par laser

Le principe de fusion par laser est d'abord appliqué aux poudres polymères comme en atteste le brevet US5316580 déposé par Carl Deckard en 1992. Puis cette technologie sera appliquée aux poudres métalliques dès 1995 à l'Institut Fraunhofer de Aachen (Allemagne). Elle sera protégée par plus de 50 brevets, encore en vigueur aujourd'hui. La technique puise ses sources dans deux disciplines : l'optique et les sciences des matériaux. Les recherches en optique ont adapté le soudage laser à la

fabrication par couche tandis que la métallurgie a transformé les métaux, par atomisation, sous une forme pulvérulente adaptée à la fabrication par couches.

Du côté des constructeurs de machines, Realizer GmbH a joué le rôle de pionnier en sortant un premier modèle dès 1999 et en déposant la mention « SLM » Selective Laser Melting, expression devenue courante pour désigner ce procédé. Le spécialiste de la machine-outil Trumpf avait proposé le modèle Trumaform 250 en 2005 avant de stopper ses développements pour le marché additif. En 2014, avec Realizer,

on dénombre sept constructeurs de machines de fusion de poudres métalliques par laser : EOS, Concept Laser, SLM Solutions, Trumpf, 3D Systems, et Renishaw.

Les améliorations techniques apportées au procédé et l'élargissement de la palette des matériaux métalliques disponibles font du SLM un procédé désormais adapté à la fabrication directe. Depuis 2010, les experts et praticiens estiment que le SLM atteint un degré de maturité suffisant pour être qualifié pour la production en série dans des secteurs tels que l'aéronautique, le spatial ou l'automobile. Comme illustré sur la **figure 1**, le cabinet d'études Wohlers avait mesuré la part de la fabrication directe : absente au début des années 2000, elle représentait 28,3% du marché total de la fabrication additive en 2013. Et la tendance montre encore un fort potentiel de croissance. Plus globalement, selon Wohlers<sup>[4]</sup>, le revenu de la fabrication additive attendu pour 2017 est estimé à 6 milliards \$. La fusion de poudre métallique par laser présente les mêmes avantages que l'ensemble des procédés additifs : liberté géométrique et flexibilité en production. Toutefois, le Laser Beam Melting (LBM) abréviation similaire à SLM mais non déposée, présente aussi les contraintes dues aux matériaux métalliques et à leur mise en œuvre à haute température. Alors, quelles sont ses caractéristiques ? La **figure 2** schématise ce procédé. L'alliage se présente sous forme de poudre d'une granulométrie inférieure à 50 µm. Il est étalé par un racleur en lit d'une épaisseur variable de 30 à 50 µm. La poudre nécessaire au cycle de fabrication complet est réservée dans un bac conjoint. Le faisceau laser YAG à fibre optique, d'une puissance de 400 à 1 000 W est orienté par des miroirs pour balayer sélectivement le lit de manière à fusionner les grains dans les zones définies en amont par le fichier numérique. Le point de fusion est variable selon l'alliage métallique utilisé mais au point focus du laser, la température peut atteindre 2 000 °C, faisant fondre la couche de poudre supérieure mais aussi une ou plusieurs des couches inférieures, créant ainsi localement un bain liquide. La solidification des couches successives formera la pièce. L'ensemble de la production se déroule dans une chambre contrôlée sous atmosphère azote ou argon évitant l'oxydation voire l'inflammation des métaux. Au fil de la fabrication, le bac de réserve monte pour délivrer la poudre tandis que le plateau de fabrication descend d'un pas équivalent à l'épaisseur d'une couche

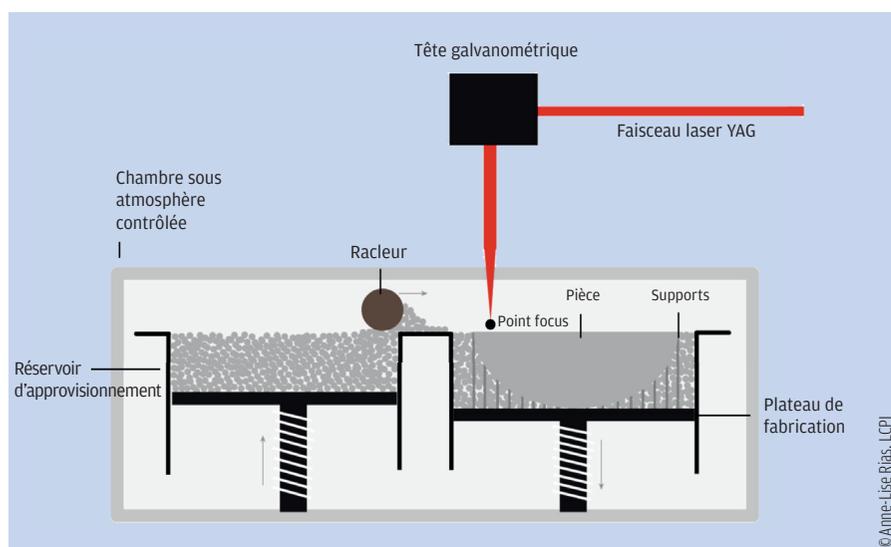


FIGURE 2 : Principe de la fusion de poudre par laser.



FIGURE 3 : Modèle XLine 1000R de Concept laser, grand volume de fabrication.

fusionnée. Contrairement au procédé de fusion de poudre polymère, la pièce en cours de fabrication ne peut pas être supportée uniquement par la poudre non fusionnée qui l'entoure. Des « échafaudages » ou supports sont alors prévus et fabriqués en même temps que la pièce. Ils contribuent au maintien de la pièce dans le lit et évitent d'éventuels effondrements qui déformeraient la géométrie finale. Ils jouent également le rôle de dissipateurs thermiques, pour répartir plus largement dans la pièce la chaleur concentrée autour du point focus.

### Des développements significatifs

De nombreuses améliorations ont été apportées à ce principe technique développé à la fin des années 1990. Les premiers lasers d'une puissance de 100 W atteignent aujourd'hui 1 kW tandis que leur vitesse d'avance a été multipliée par deux et est mieux contrôlée. Les chambres de fabrication ont également pris du volume. Le modèle offrant les plus grandes dimensions est le XLine 1000R de Concept Laser (figure 3) avec 630 × 400 × 500 mm. 3D Systems a également annoncé lors du

récent salon Euromold 2014 un modèle de grandes dimensions : le ProX400 avec une chambre de 500 × 500 × 500 mm pour la fusion de poudres métalliques.

La gamme de matériaux disponibles s'est également élargie et compte aujourd'hui plus d'une vingtaine de matériaux standards. Parmi eux : les alliages titane dont les biocompatibles, les superalliages à base nickel, les alliages chrome-cobalt, les aluminiums, les aciers et l'acier inoxydable ou encore le cuivre. Cette palette est encore en constante évolution, motivée par la recherche de nouvelles applications. En parallèle du LBM, des projets de recherche sont menés sur la fabrication de pièces à gradient de matériaux métalliques, par projection de différentes poudres. De manière générale, ces avancées techniques ont amélioré la qualité des pièces et aident à atteindre l'objectif optimal du produit 100 % dense, sans porosité ni fissure et respectant les tolérances dimensionnelles. Bien que proposant différentes dimensions de chambres de fabrication, les machines de fusion ont des capacités de plus en plus similaires en termes de précision, concernant l'épaisseur de couche

« Les premiers lasers d'une puissance de 100 W atteignent aujourd'hui 1 kW tandis que leur vitesse d'avance a été multipliée par deux et est mieux contrôlée. »

**Goodfellow**  
www.goodfellow.fr

**Votre  
partenaire  
en métaux  
et matériaux**

Goodfellow SARL  
229 rue Solférino - 59000 LILLE  
Tél : 0800 917 241 (N° vert)  
Fax : 0800 917 313 (N° vert)  
france@goodfellow.com

CATALOGUE EN LIGNE



RAPIDITÉ



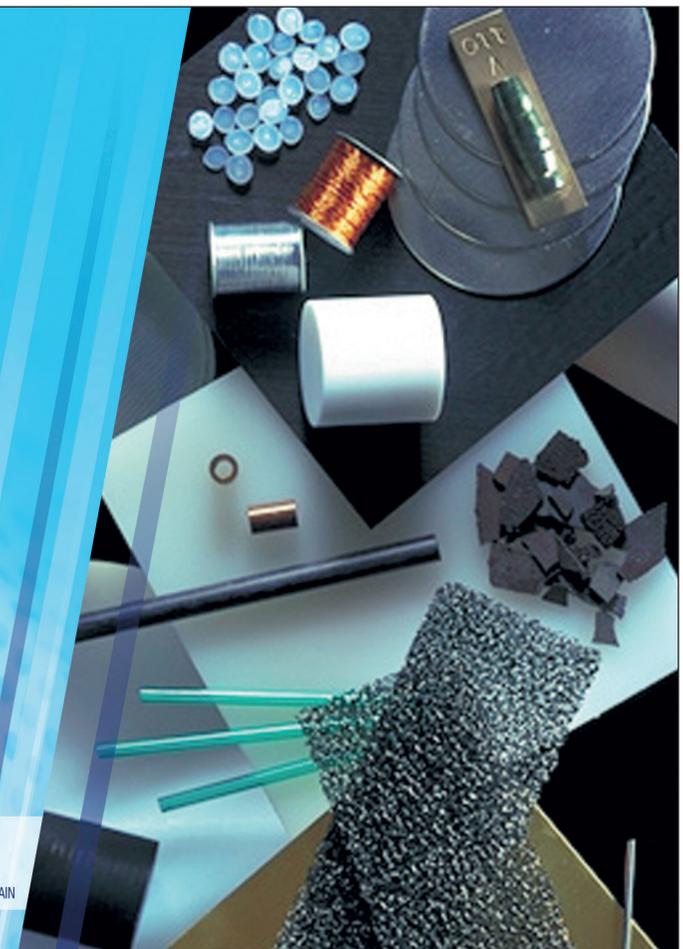
70 000 PRODUITS



SUR-MESURE



GESTION DE VOTRE SUPPLY CHAIN



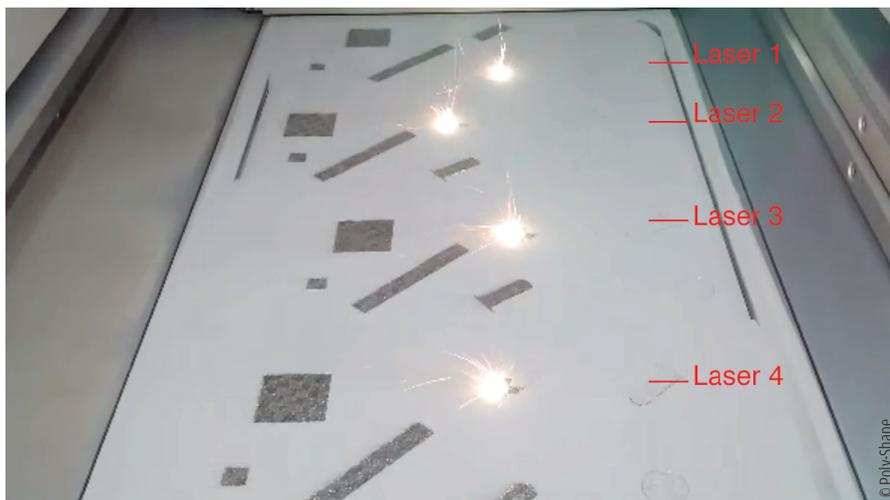


FIGURE 4 : La machine SLM 500 dispose de quatre lasers indépendants.

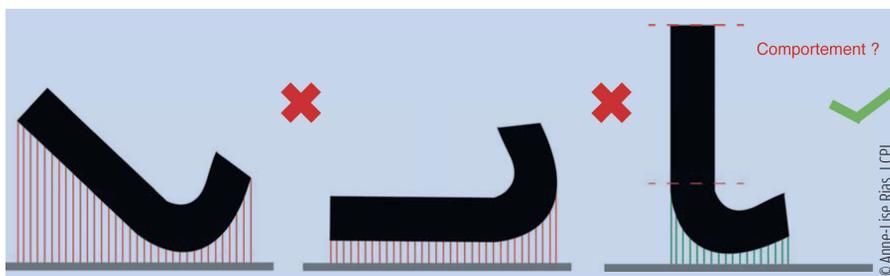


FIGURE 5 : Stratégie d'orientation de la pièce sur le plateau de fabrication.

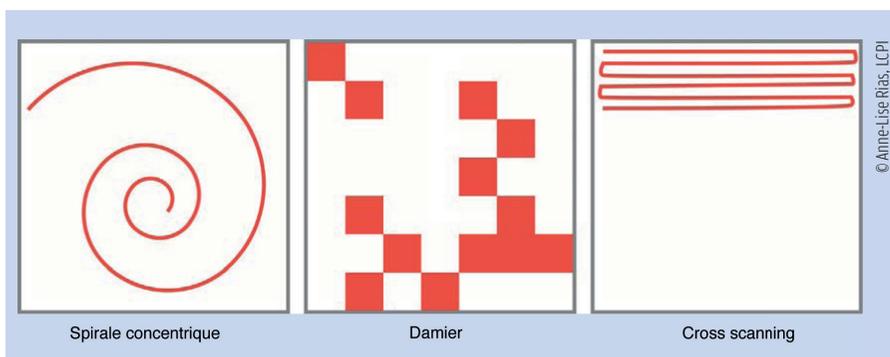


FIGURE 6 : Les trois principales stratégies de parcours du laser.

Machines	AM250 de Renishaw	SLM 500 de SLM Solutions	XLine 1000R de Concept Laser	SLM 250 de Realizer	M280 de EOS	Pro X 400 de 3D Systems
Précision (ép. de couche min et max annoncées)	20-100 µm	20-200 µm	30-200 µm	20-100 µm	20-100 µm	10-100 µm
Dimensions chambre (mm)	250 × 250 × 300	500 × 280 × 325	630 × 400 × 500	250 × 250 × 300	250 × 250 × 325	500 × 500 × 500

TABLEAU 1 : Données comparatives des 6 constructeurs du marché.

comme la précision dimensionnelle, en moyenne de l'ordre de 0,1-0,3 mm pour les machines citées (tableau 1) [3]. En fusion par laser, la précision dimensionnelle dépend plus spécifiquement des paramètres machines choisis, du matériau associé et de la géométrie de la pièce que de la capacité de la machine fournie par le constructeur, elle est donc contrôlée au cas par cas.

Si la bonne qualité des pièces est une preuve de maturité et rend crédible le procédé auprès des industriels, atteindre une cadence suffisante pour satisfaire les besoins de la production en série est un autre enjeu. En effet, cantonner la fabrication additive à la pièce unique et à la petite série semble de moins en moins réaliste. Plusieurs initiatives, de la part de constructeurs de machines comme de grands donneurs d'ordres industriels ouvrent la voie de la fabrication rapide en série. Ils marquent ainsi la volonté de tirer parti de la liberté géométrique propre à la fabrication par couches tout en satisfaisant les attentes des marchés actuels. Ainsi, GE Aviation avait présenté début 2013 son projet « buse d'injection de carburant » pour le moteur LEAP équipant les Airbus A320neo, fabriqué à 40 000 exemplaires par an.

Pour atteindre cet objectif, le géant américain a choisi d'aligner plusieurs dizaines de machines de fabrication additive et d'y associer autant d'opérateurs. Dans le secteur des solutions orthopédiques, la société italienne Lima Corporate vient tout juste de passer commande de cinq machines Arcam Q10 pour produire en série. Un investissement stratégique de plus de 3 millions €. Le constructeur japonais DMG Mori a lui misé sur l'hybride. En combinant dans la même machine un système de fabrication additive et des outils d'usinage, il souhaite éliminer les opérations intermédiaires et les reprises post-production, afin d'obtenir plus rapidement une pièce finie.

Concernant le LBM, la stratégie est concentrée sur l'accélération de la vitesse de fabrication. La deuxième génération de machines est disponible depuis 2013. Elles sont « multi-sources ». L'allemand SLM Solutions et l'américain 3D Systems proposent des machines équipées de deux à quatre lasers. Ainsi, les modèles SLM 280 et SLM 500 (figure 4) ont respectivement deux lasers de 400 ou 1 000 W et quatre lasers 400 W. Ces lasers travaillent de manière conjointe ou indépendante, selon les stratégies choisies pour fusionner le contour de la pièce et remplir son volume interne.

Mais si la cadence de production est ainsi plus élevée, les multisources ne résolvent pas le

problème de l'accumulation de contraintes thermiques, métallurgiques et mécaniques au sein de la pièce pendant la fabrication. Ils pourraient même le renforcer. Ces phénomènes constatés en production mettent finalement en lumière la nécessité de les anticiper plus en amont, dès les premières phases de conception d'un projet.

### De multiples contraintes à gérer

La relative nouveauté de la fabrication rapide et en particulier du procédé LBM laissent encore apparaître de nombreuses inconnues. La multiplication des projets réalisés çà et là en Europe et dans le monde a permis de démontrer la maturité du procédé, mais elle bouscule aussi toute une organisation industrielle, des donneurs d'ordres aux fabricants en passant par les bureaux d'études et les fournisseurs. Une chaîne complète de partenaires doit alors se mettre en place.

Dès l'amont, il s'agit de faire changer les habitudes des donneurs d'ordres et des concepteurs formés pour les procédés traditionnels soustractifs. Avec de nouvelles capacités en termes de géométries, matériaux, fonctions et complexité, une nouvelle définition du DFM (Design For Manufacturing) peut être proposée : le DFAM (Design For Additive Manufacturing). Les méthodes de DFAM permettent de synthétiser ces particularités pour en tirer parti au mieux pour répondre aux spécifications attendues. La mise en pratique de ces nouvelles méthodes exige des capacités spécifiques de la part des concepteurs, notamment [5] :

- pouvoir explorer un « espace de design » (l'espace des solutions possibles) sans focaliser prématurément sur une solution ni se censurer par l'argument « ce n'est pas faisable » ;
- pouvoir concevoir et simuler ces solutions complexes.

Pour opérer ce changement, le transfert de connaissances de la recherche vers l'industrie est favorisé. De nombreuses journées de formation théorique et/ou pratique sont également proposées par les centres techniques français, via les pôles de compétitivité ou directement par les entreprises de fabrication additive. Faire appel à des méthodes créatives et à des professionnels tels que les designers industriels peut également favoriser le changement d'habitude et de point de vue.

En conception, la R&D et les bureaux d'études se mobilisent pour prendre en compte au plus

tôt les caractéristiques et limites du LBM. Les recherches se concentrent autour de deux problématiques fortement liées :

- Quelle orientation de la pièce faut-il choisir pour limiter la quantité de supports nécessaire tout en garantissant une bonne tenue sans déformation en cours de fabrication ? (figure 5)
- Quelle stratégie de parcours du laser choisir pour limiter la concentration de contraintes au sein de la pièce ? (figure 6)

Les choix faits en conception et en production impactent fortement le nombre et le type d'opérations nécessaires en post-production, donc le temps et le coût associés à cette phase. Cependant, la gestion des contraintes résiduelles après fabrication reste incontournable. Un traitement thermique est donc systématiquement appliqué : les pièces encore liées à leur plateau sont placées en four de détensionnement en dessous de 1 000 °C pour une durée déterminée. Ce recuit permet de dissiper les tensions accumulées au cours de la fabrication. Des traitements type compression isostatique à chaud peuvent également être appliqués pour augmenter la densité des pièces. La simulation numérique de procédé peut aider à anticiper tous ces phénomènes physiques en jeu lors de la fusion par laser : les changements de phases, les variations dans la microstructure ou encore les phénomènes de dilatation et retrait. Mais l'application de la simulation à la fabrication additive est récente, complexe et limitée par les puissances de calcul actuelles. Elle n'a pas encore permis la mise sur le marché d'un outil opérationnel pour les bureaux d'études. Toutefois, dans les entreprises, les expérimentations et la réalisation de projets permettent

d'accumuler des connaissances suffisantes pour que le LBM soit progressivement qualifié auprès de plusieurs industries.

### Applications matures et à venir

Depuis une dizaine d'années, de nombreuses industries se sont montrées intéressées par la fabrication rapide métallique. Deux secteurs semblent déjà tirer leur épingle du jeu : le biomédical et le sport automobile tandis qu'un troisième champ d'application se précise, celui des pièces de vol pour l'aéronautique et le spatial.

Le biomédical, industrie des implants et prothèses, a trouvé dans la fabrication rapide métallique une réponse optimale à ses besoins. Des produits sur-mesure pour chaque patient, un titane biocompatible et des délais de production raccourcis permettent de reconstruire le visage de plusieurs centaines de patients chaque année. La pièce unique est fabriquée directement à partir d'un scanner 3D du patient réalisé par son chirurgien. Visible sur la figure 7, le motif ajouré dit « treillis » est étudié pour favoriser la colonisation par les cellules osseuses après implantation. Ces dispositifs médicaux, volets crâniens, mandibules inférieures ou encore implants dentaires sont certifiés par la norme ISO 13485, validée depuis 2010 dans la société Polyshape. Ce marché est donc certainement le plus mature actuellement, même si avec moins de 10 000 pièces produites par an, il ne relève pas de la grande série.

Le secteur du sport automobile trouve également satisfaction avec la fabrication rapide métallique. Fabriquer plusieurs pièces en une seule, sans outillage spécifique et rapidement sont des caractéristiques qui répondent aux besoins du marché

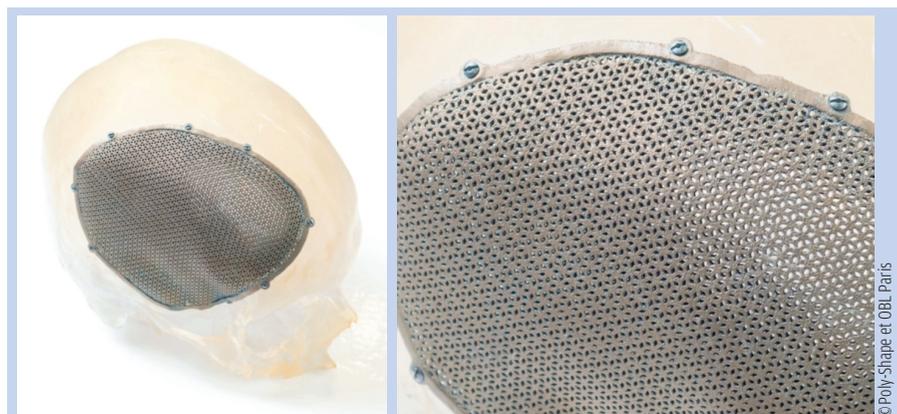


FIGURE 7 : Volet crânien.

## Bibliographie

- [1] Afnor, 2011. NF E 67-001.
- [2] CK. Chua, SM Chou, TS Wong, 1998. A study of the state of the art rapid prototyping technologies. *Paper in International Journal of Advanced manufacturing technology (14) pages 146-152.*
- [3] G. Levy, R. Schindel, JP Kruth, 2003. *Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing technologies (LM), state of the art and future perspectives.* Paper in CIRP Annals (52) pages 589-609.
- [4] Wohlers Associates, 2013. *Additive manufacturing and 3D printing state of the industry.* Annual worldwide progress report.
- [5] D. Bourell, PM. Leu, D. Rosen, 2009. *Roadmap for additive manufacturing. Identifying the future of freeform processing.* Book 93 pages, University of Texas.
- [6] Karunakaran, 2012. *Rapid manufacturing of metallic objects.* Paper in Rapid Prototyping Journal pages 264-280.



FIGURE 8 : Support de colonne de direction, Formula student.



FIGURE 9 : Démonstrateurs de l'allègement par optimisation.

international du sport mécanique (figure 8). Intégrer plusieurs pièces (5) en une seule et optimiser la géométrie issue de cet assemblage permet d'alléger le poids total des composants (de 200 g à 128 g soit une réduction de 56 %) et d'en faciliter le montage. Les alliages titane élevés présentent des caractéristiques mécaniques similaires à des pièces fabriquées par procédés traditionnels. Même s'il s'agit là d'un marché limité à quelques centaines de pièces par an et non grand public, la fusion par laser devient sur ce point, un procédé assez mature pour faire de l'ombre à la fonderie. La possibilité, propre à la fabrication par couche, d'alléger les pièces tout en gardant une bonne tenue mécanique a été plusieurs fois illustrée (figure 9) [6]. En effet, la réduction de masse et donc de la consommation de carburant est incontournable pour les industries aéronautique et spatiale. Les études d'optimisation topologique visent donc à remplacer les volumes massifs par des structures lattice en fonction des efforts appliqués à la pièce. Mais si ce marché semble porteur,

il est aussi particulièrement exigeant. En effet, les procédures pour qualifier une géométrie de pièce, associée à un matériau et fabriquée avec des paramètres de fabrication adaptés peuvent s'étaler sur plusieurs années et comporter de nombreuses itérations. Pour les pièces avionables, la maturité n'est donc pas encore atteinte mais très prometteuse. En marge de ces trois secteurs principaux, d'autres applications variées émergent. Les industries du bâtiment, de l'électronique, de l'énergie ou de la bijouterie publient régulièrement leurs nouvelles avancées. Dans le paysage de la fabrication industrielle, le LBM fait figure de dernier-né, les applications de demain restent donc encore à imaginer. Finalement, la maîtrise du procédé et son orientation vers la production en série pourraient bien rendre la fusion de poudre métallique incontournable. Elle est aujourd'hui employée exceptionnellement pour quelques pièces particulièrement complexes mais ces deux orientations devraient favoriser sa diffusion dans l'industrie manufacturière.