

IMPRESSION 3D

Une révolution industrielle

GABRIELLE CARPEL ET FRANÇOIS JULIAN^[1]

Les industriels aéronautiques sont unanimes : la fabrication additive, plus connue sous le nom d'impression 3D, pourrait révolutionner la fabrication des avions. Pourquoi et comment ? Explications.

Il était en septembre dernier, à Peebles dans l'Ohio : le premier moteur Leap de CFM International (Snecma - General Electric) réalisait ses premiers essais au banc. Parmi la quantité d'innovations technologiques qu'il incorpore se trouvaient des injecteurs de carburant fabriqués en impression 3D. Quelques semaines plus tôt, c'était la Nasa qui testait un injecteur de moteur de fusée fabriqué de la même manière. En juin, l'A350 faisait son premier vol avec à son bord des pièces de structure également fabriquées en impression 3D. Visiblement, 2013 pourrait être l'an I de l'impression 3D dans l'aéronautique.

Additive

Impression 3D, ou plutôt, devrait-on dire, fabrication additive, par opposition aux méthodes de fabrication classique, comme l'usinage, où l'on soustrait de la matière pour obtenir la pièce finale. Cette technique de production est l'une des plus prometteuses du moment. Son principe : fabriquer une pièce, de préférence de forme complexe, par couches successives, au moyen d'un modèle 3D conçu par CAO (conception assistée par ordinateur). À ce jour, il existe plusieurs techniques d'impression 3D, même si c'est la fusion laser qui prédomine dans l'aéronautique (voir en encadré).

Si elle est très en vue ces derniers mois, il ne faut pourtant pas s'y tromper : l'impression 3D est une technique connue depuis déjà plusieurs années, que ce soit dans l'aéronautique, l'automobile, le domaine médical ou bien encore dans la joaillerie. Ainsi, le principe de la stéréolithographie qui, grâce à la polymérisation en plusieurs dimensions d'une poudre de résine, permettait déjà il y a une vingtaine d'années de créer rapidement et à moindres coûts des prototypes de pièces. Le problème, c'est que ces pièces ne pouvaient pas avoir d'autre utilité que le prototypage, du fait de leur faible solidité.

Mais aujourd'hui les choses ont changé. Les techniques ont suffisamment évolué, et l'impression 3D est applicable à la production de pièces métalliques. Mieux, il est dorénavant possible d'aboutir à des propriétés mécaniques

mots-clés

machine, procédé, prototypage, usinage



■ **L'impression 3D, ou fabrication additive, est en marche chez Snecma** : l'industriel possède trois machines (ci-dessus) et a déjà fabriqué 500 pièces expérimentales dont l'étage redresseur du compresseur haute pression (ci-contre, avant et après usinage) destiné au moteur Silvercrest (en bas à droite)

proches de celles des pièces obtenues par forgeage. L'impression 3D s'est en effet ouverte à des matériaux très résistants comme le titane, l'un des métaux utilisés dans l'industrie aéronautique, ou encore les superalliages (type Inconel). Ainsi, on peut envisager l'utilisation de ce procédé pour fabriquer des pièces de développement, voire de série, en se libérant des contraintes liées au forgeage ou à la fonderie à la cire perdue.

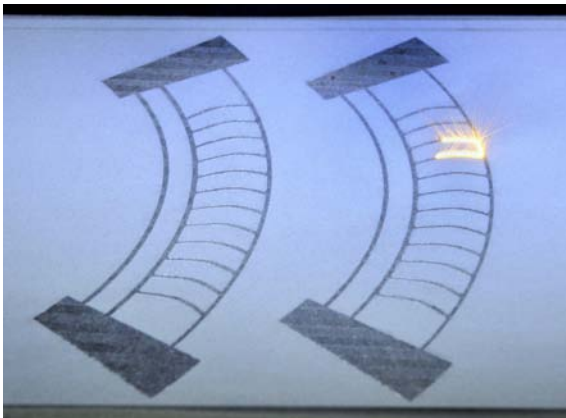
Si bien que ce procédé intéresse aujourd'hui tous les grands industriels du secteur : Airbus, Dassault Aviation, General Electric, Snecma, MBDA, pour ne citer que les principaux. En fait, il n'est pas étonnant de constater que ce procédé a d'abord séduit les fabricants de moteurs. Les moteurs d'avions sont en effet un secteur où se côtoient mécanique de précision, géométries complexes, et pièces dont les tailles varient du très grand au très petit.

Et, dans le domaine, deux motoristes sont en pole position : l'inséparable couple Snecma (groupe Safran) et General Electric. Si ce dernier est très avancé dans le domaine, c'est pourtant le motoriste français qui fut le premier à tester un moteur doté de pièces fabriquées par impression 3D. Chez Snecma, cela fait en

[1] Article repris d'*Air & cosmos*, n° 2384, 29 novembre 2013.



© SNECMA / C. COSMARO



© SNECMA



© SNECMA

effet quatre ans que l'on travaille sur cette technologie par le biais de recherches entièrement autofinancées qui impliquent une dizaine de personnes dans l'usine d'Évry-Corbeil, en région parisienne.

TRL 7

« Nous avons déjà fabriqué plus de 500 pièces expérimentales, et nous sommes arrivés à un niveau de maturité technologique de type TRL 7 [Technology Readiness Level] sur certaines productions. Snecma est l'un des industriels de l'aéronautique qui développe le mieux ce procédé de fabrication », confie Pierre Letord, chef de la division Moyens industriels (DMI) de l'usine de Snecma à Évry-Corbeil.

Pas étonnant donc que le motoriste français se soit doté d'une machine de fabrication additive performante : une machine Concept Laser, qui n'existe pour le moment qu'à cinq exemplaires, en complément des deux moyens classiques investis en 2010.

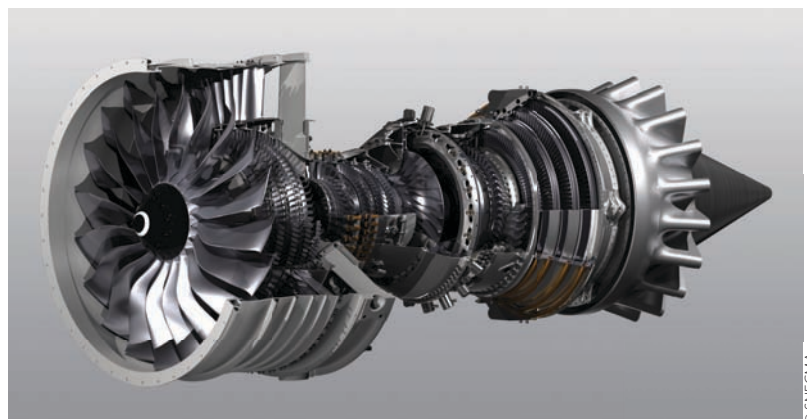
Grâce au procédé de fusion laser appliqué à des poudres de superalliages, le motoriste français a fabriqué certains des étages redresseurs du compresseur haute pression de son moteur Silvercrest (destiné au Falcon 5X de Dassault Aviation et au Citation Longitude de Cessna). Des pièces encore expérimentales, mais qui sont testées au banc depuis déjà un an, sur l'un des exemplaires d'essai de ce moteur.

Repères

Un gain de masse de **25 à 60 %** selon les applications

Regrouper un assemblage de **plusieurs pièces en 1 seule**

Un niveau de **maturité technologique** de type TRL 7



© SNECMA



■ Chacun des dix-huit injecteurs de la chambre de combustion du moteur Leap est fabriqué en impression 3D. Ce sera également le cas pour le GE9X

Pour Snecma, reste maintenant à choisir : faut-il inclure ces pièces sur les Silvercrest de série? Le choix n'est pas simple, car ce serait alors une technique de production qu'il faudrait faire passer du niveau du développement au niveau de la production en série. Néanmoins, l'industriel français se veut confiant, d'autant qu'il estime avoir une maîtrise suffisante du procédé pour obtenir des pièces dont les propriétés physiques sont comparables à celles de pièces forgées.

Un seul bloc

Parmi les avantages, il y aurait notamment la possibilité de regrouper en un seul et même bloc ce qui était jusque-là un assemblage de plusieurs pièces. Ainsi, dans le cas d'un étage redresseur obtenu par forgeage-usinage, il s'agit d'un assemblage de deux viroles (intérieure et extérieure) entre lesquelles viennent se caler des aubes. En réalisant cette pièce par fabrication additive, on obtient donc un gain notable d'étanchéité, ainsi qu'une possibilité de réduire la masse.

Plus généralement, un autre intérêt de l'impression 3D dans la construction des moteurs d'avions, c'est la possibilité d'obtenir très rapidement et à moindres frais une pièce expérimentale dont on peut faire évoluer la forme.

« Maintenant, avec ce procédé, il suffit que la direction technique modifie son modèle CAO pour faire évoluer les profils des pièces de développement. Cela permet une réduction substantielle du cycle de fabrication ! Il n'y a plus besoin de faire de modifications de gammes d'usinage des pièces taillées dans la masse ni de retouches du moule des pièces de fonderie », précise Pierre Letord.

Grâce à l'impression 3D, il est également possible d'intégrer des fonctions supplémentaires, par exemple des emplacements pour les capteurs d'une instrumentation d'essais, ou des circuits de refroidissement internes, qu'il serait impossible d'obtenir par usinage.

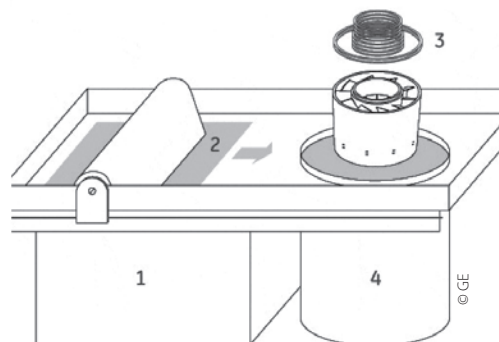
Logique industrielle

Il y a aussi derrière la fabrication additive une logique industrielle séduisante : Snecma, par l'intermédiaire de CFM International, est tenu de garder en production des pièces destinées à des moteurs anciens, comme les CFM56-2 et 3. Ce qui suppose le maintien en service de moules de fonderie. La fabrication additive permettrait

Principe de fonctionnement d'une machine par fusion laser

Le matériau brut, très généralement présenté sous forme de poudre, est stocké dans un compartiment (1) pouvant se déplacer du bas vers le haut. Un système de racleur (2) va venir prélever une petite quantité du matériau et la déposer sur la surface de travail, sous la forme d'une couche d'une épaisseur d'environ 20 à 100 microns. C'est là qu'un laser (3), généralement d'une puissance de 200 watts, va venir faire fondre des zones bien précises de cette couche, en dessinant une forme selon un modèle 3D préalablement défini. Une fois ce « dessin » terminé, le plateau (4) s'abaisse de l'épaisseur de la couche, et le racleur vient déposer une nouvelle couche. La pièce est ainsi fabriquée, du bas vers le haut, par l'empilement successif de ces différentes couches.

Pour l'heure, le procédé est relativement long. S'il ne faut que deux heures pour terminer une pièce simple, certaines plus complexes demandent jusqu'à 120 heures de travail. Fort heureusement, le procédé est entièrement automatisé, et peut donc fonctionner de jour comme de nuit, sans interruption. Une fois la pièce terminée, elle requiert bien souvent une phase de finition, afin d'améliorer son état de surface.



■ EADS Innovation Works possède quatre imprimantes laser métal

de se dispenser de ces moules pour ne plus fabriquer ces pièces qu'à la demande.

Enfin, dernier avantage : avec la fabrication additive, le cycle de fabrication pourrait être réduit à quelques semaines, contre plusieurs mois pour une pièce de fonderie. Alors même qu'il est toujours nécessaire d'inclure

Des obstacles qui restent à franchir

Dans une lettre d'information publiée en mai dernier, le cabinet de conseil PricewaterhouseCoopers fait état de trois « points durs » liés à cette technologie. D'abord, la fabrication additive ne fonctionne pas encore avec tous les matériaux. Bien maîtrisée avec les plastiques, elle n'en est encore qu'à ses débuts avec les métaux, bien que certains industriels aient atteint un niveau de maturité technologique élevé (TRL de 7 et plus) avec le titane, les alliages base nickel ou tout simplement l'acier.

L'autre problème, c'est bien évidemment l'intégrité structurelle. Par nature, la fabrication additive peut induire une certaine forme de porosité de la pièce. Si cette porosité a fait l'objet d'une réduction, le cabinet de conseil estime que cette présence de microcavités, et la brève exposition à une forte température au moment de la fabrication, limitera ces pièces à des applications sans contraintes mécaniques excessives. D'un autre côté, certains industriels comme Airbus ou Snecma estiment être parvenus à des propriétés physiques proches de celles obtenues avec des pièces forgées et usinées.

Enfin, ces machines de fabrication additive coûtent cher, souvent de 0,5 à 1 M€, mais, dans le cas précis de l'aéronautique, ce n'est finalement pas un obstacle en soi, puisqu'une machine d'usinage classique a bien souvent un coût similaire voire supérieur.

En l'état, l'industrie s'accorde à dire que l'impression 3D ne sera pas applicable à la fabrication de toutes les pièces d'avion, et se veut plus un complément aux méthodes de production classiques.



© EADS

■ La géométrie des pièces est repensée (modèle du bas) car elle n'est plus limitée par la fabrication conventionnelle

une phase de finition de la pièce, principalement pour améliorer son état de surface. Restent néanmoins des obstacles à franchir (voir en encadré) et des limitations, comme la taille des pièces que l'on peut ainsi fabriquer, limitée à la taille du plateau des machines. De même, toutes les géométries ne sont pas encore totalement maîtrisées. « On ne peut pas construire dans le vide, explique un spécialiste chez Snecma, et il y a parfois des risques de déformation ou d'effondrement dans le cas des pièces de grande taille lors de la fabrication. Ça suppose parfois d'ajouter des "fondations" à la pièce, qu'il faut retirer ensuite. »

Pièces de structure

Pour le motoriste français, l'objectif sera ensuite d'étendre ce procédé de fabrication aux pièces de structure (donc soumises à des contraintes mécaniques plus importantes), puis plus tard aux pièces en titane. D'ici là, les experts de Snecma vont également étudier la possibilité de produire des pièces en impression 3D pour les moteurs matures, fabriqués en petite quantité.

Il sera également question de fabriquer des pièces pour de futurs moteurs, par exemple le démonstrateur de moteur *open rotor* de Snecma, qui doit être testé au banc d'ici à deux ans.

Dans le domaine des moteurs, l'autre pionnier, c'est GE Aviation, qui a pu compter sur l'énorme activité de recherche & technologie (R&T) du groupe General Electric. Le groupe américain s'intéresse au sujet depuis 2003, ce qui lui a également permis d'obtenir une bonne maîtrise de la fusion laser.

Ainsi, c'est avec ce procédé que sont fabriqués les injecteurs de carburant de la chambre de combustion du moteur Leap de CFM International. De forme particulièrement complexe, ces injecteurs étaient jusqu'alors un assemblage de dix-huit composants, dorénavant réunis en un seul et même bloc plus léger. Le procédé a également permis l'intégration d'un circuit de refroidissement interne réduisant le phénomène de pyrolyse du carburant, qui dégrade les performances des injecteurs avec le temps. GE estime que d'ici à 2020 il aura déjà produit plus de 100 000 pièces de moteurs d'avions en fabrication additive pour le Leap et le GE9X (le moteur du futur 777X).

À bord de l'A350

Chez Airbus, où on travaille sur le sujet depuis trois ans, on entrevoit également un grand potentiel : « Cela va être un gros changement pour l'industrie », estime Peter Sanders, ingénieur responsable des techniques de fabrication additive chez Airbus. Chez le constructeur européen, 300 pièces de ce type ont été fabriquées. Parmi elles, des supports métalliques pour câbles électriques volent déjà sur MSN 002, le deuxième prototype de l'A350-900. « Nous sommes parvenus à des pièces ayant des propriétés mécaniques équivalentes à celles des pièces forgées et usinées, et qui peuvent soutenir une masse de 27 tonnes », précise l'ingénieur allemand. Plus tard, ce sera l'A350-1000 qui sera doté de charnières de porte ainsi fabriquées. Des pièces installées sur les avions d'essai et qui devraient également prendre place sur les avions de série.

« L'impression 3D a un énorme potentiel pour les pièces dont la fabrication par usinage produit habituellement beaucoup de copeaux. Cela permet également d'envisager des pièces d'une géométrie bien plus complexe, qui sont plus inspirées du monde du vivant », poursuit Peter Sanders.

Pour l'heure, le constructeur ne dispose que d'une seule machine, acquise il y a un peu moins de deux ans, dans son usine de Hambourg. Maîtrisant ce procédé de fabrication avec l'acier et le titane (type Ti 6-4), le constructeur estime que d'ici à 2016 il pourra fabriquer des pièces en aluminium avec l'impression 3D. « Grâce à la fusion laser, on peut envisager des réductions de masse de 25 à 55 % selon le type de pièces », précise-t-il.

Airbus, mais aussi Eurocopter utilisent déjà des pièces imprimées en 3D, qu'elles soient en polymère

ou en métal. Et c'est ces dernières qui intéressent en particulier EADS Innovation Works (IW), le département R&D du groupe européen. « Le titane, très utilisé en aéronautique, est un matériel cher et difficile à usiner », explique Claudio Dalle Donne, vice-président d'EADS IW et spécialiste de la fabrication additive. « Nous cherchons donc des procédés qui utilisent moins de matière et qui diminuent l'usinage des pièces en titane », poursuit Claudio Dalle Donne. Deux conditions que la fabrication additive semble remplir.

Titane

Au cours de ces dernières années, EADS IW s'est penché sur la fabrication additive de pièces en titane et en aluminium ainsi que sur des « matériaux plus exotiques » tels que le platine destiné à leurs applications spatiales chez Astrium. Le département a acquis un parc de quatre imprimantes 3D métal, trois à fusion laser – deux en Angleterre et une en Allemagne –, et une imprimante à fusion par faisceau d'électrons (ou EBM pour *Electron Beam Melting*) à Bristol.

« La fabrication additive est particulièrement profitable à l'aérospatial, qui a besoin de pièces très complexes », explique Claudio Dalle Donne. Le principal avantage de ce nouveau procédé tient en effet dans la possibilité de fabriquer des pièces avec une structure interne complexe.

Reconception

Au-delà de l'intérêt de regrouper en un seul et même bloc différents éléments, la fabrication additive permet de repenser la conception. Les pièces peuvent désormais être conçues avec une prise en compte de leur fonctionnalité en tout premier lieu, et non des limites des procédés conventionnels. Un avantage qui permet de libérer les pratiques de conception et qui ouvre la voie à des possibilités d'optimisation jusqu'alors non atteignables.

« Si l'on veut vraiment exploiter le potentiel de ce procédé, nous devons repenser notre manière de concevoir les pièces, explique le vice-président d'EADS IW. Nous pouvons penser les éléments de manière complètement différente, avec une optimisation topologique par exemple. Aujourd'hui, nous commençons par fabriquer exactement la même pièce, mais si à terme nous ne réussissons pas à la redessiner, nous ne considérons pas cela comme une victoire. »

On retrouve cette réflexion de « reconception » du design chez les responsables de l'impression 3D du Centre de recherche aérospatial néerlandais (NLR), qui a récemment acheté une imprimante à fusion laser pouvant passer de 400 W à 1 kW. Le NLR va même plus loin en réfléchissant à des « règles de conception » qui devront être mises en place pour permettre aux ingénieurs de faire un usage optimal des possibilités offertes par la fabrication additive. Parmi ces règles, on peut énumérer : les épaisseurs maximale et minimale de la paroi de la pièce en fonction du matériau et de la

Les risques sanitaires de l'impression 3D à l'étude

En parallèle de l'étude sur les matériaux et nouveaux procédés de l'impression 3D, le NLR (Centre de recherche aérospatial néerlandais) a pris des mesures visant à éviter les risques pour la santé des imprimantes à fusion laser. En effet, le processus de fusion laser fonctionne avec des poudres métalliques très fines de l'ordre de 10 µm à 60 µm (micromètre, ou micron : 10⁻⁶ ; picomètre : 10⁻¹² m). Ces petites particules, en particulier les alliages de nickel et de chrome, peuvent présenter un risque pour la santé des opérateurs quand ils sont en suspension dans l'air.

La Nasa compte elle aussi mener des recherches quant aux risques potentiels des imprimantes 3D sur la santé des astronautes avant d'en envoyer une sur la station spatiale internationale à la fin de l'année 2014.

courbure ; les endroits où des supports sont nécessaires pour ancrer la pièce dans l'imprimante ; la rugosité de surface. Ces règles illustrent parfaitement le bilan que font les industriels et instituts de recherche du secteur : l'impression 3D présente des avantages énormes pour l'aéronautique, mais elle ne remplace pas les procédés traditionnels, elle les complète.

Aujourd'hui, EADS IW commence à réfléchir à la possibilité de produire des pièces plus complexes. « Nous commençons avec des pièces à faible risque (telles que les charnières de porte secondaires), puis nous allons vers des pièces de plus en plus critiques », conclut Claudio Dalle Donne.

Même chose du côté de Microturbo (qui illustre la dynamique du groupe Safran en matière d'impression 3D). La société se limite actuellement à la fabrication de pièces statiques prototypes pour des programmes de démonstration. « Nous réalisons des distributeurs haute pression, des injecteurs et des chambres de combustion qui sont des pièces complexes et fortement sollicitées thermiquement, habituellement obtenus en fonderie ou en chaudronnerie », confie Jean-François Rideau, responsable R&T chez Microturbo. Pour passer à la fabrication de pièces de série en métal, il faudra encore attendre quelques années. « Ce procédé étant émergent, tout est à construire et à mettre aux standards de l'aéronautique, ce qui prend du temps. »

Moins de matière

Pour les petites séries, la fabrication des moules ou des outillages entraîne un coût important et se répercute sur le prix de la pièce. Le procédé par fusion laser permet de réduire fortement les coûts non récurrents et les délais d'obtention des pièces.

« Il existe un nombre de pièces au-delà duquel l'impression 3D n'est plus avantageuse financièrement », précise Jean-François Rideau. Ce nombre dépend bien entendu du type de pièces fabriquées et des matériaux utilisés. Typiquement, la fabrication additive se révèle intéressante pour l'aéronautique, qui a souvent besoin de petites séries de pièces complexes.

L'impression 3D permet de réduire le temps de fabrication ainsi que la quantité de matière utilisée. Chez

Microturbo, on chiffre ce gain de temps à plus de 60 %. Pour le gain de matière, on peut atteindre les 80 %. « Aujourd'hui, avec l'usinage, on obtient une pièce de 1 kg à partir d'un galet de 10 kg. Par la fusion laser, on obtient une pièce de 1 kg avec 2 kg de matière à l'origine (il faut tout de même remplir le bac de poudre, même si toute la poudre n'est pas utilisée) », explique Jean-François Rideau.

L'espace en 3D

L'espace aussi s'intéresse de près à la fabrication additive depuis quelques années. Ainsi, la Nasa a six projets en cours sur le sujet, en partenariat avec l'US Air Force ou encore Aerojet Rocketdyne, fabricant de systèmes de propulsion de fusées et de missiles américains.

Parmi ces projets, on peut retrouver la fabrication d'un injecteur de moteur de lanceur à l'aide d'une imprimante à fusion laser. Le centre de recherche Glenn de la Nasa a ainsi, en partenariat avec Aerojet Rocketdyne, effectué le premier test à chaud de l'injecteur avec succès.

« Les efforts que nous avons récemment déployés sur des pièces de moteur de fusée prouvent que la fabrication additive peut faire économiser des mois de fabrication et d'usinage ainsi que des milliers de dollars, affirme David Steitz, porte-parole du département des technologies de la Nasa. Une partie d'injecteur qui prend généralement six mois à fabriquer pour un coût de plus de 10 000 dollars a ainsi été fabriquée en trois semaines et coûte moins de 5 000 dollars. »

Des résultats prometteurs, mais que David Steitz met en perspective avec les lacunes technologiques du procédé : « Il y a encore des obstacles à franchir, notamment dans les matériaux, les équipements, limitant les tailles des pièces, et les besoins de validation et certification des pièces une fois fabriquées. »

Des lacunes qui n'ont pas empêché Charles Bolden, administrateur de la Nasa, de déclarer lors d'une visite du centre de recherche d'Ames, en Californie : « Alors que la Nasa s'aventure de plus en plus loin dans l'espace, que ce soit pour rediriger un astéroïde ou envoyer des humains sur Mars, nous allons avoir besoin de technologies permettant de réduire le poids et le volume des cargos. Dans le futur, les astronautes seront peut-être capables d'imprimer les outils ou les composants dont



■ La Nasa, mais aussi l'ESA réfléchissent à l'impression 3D afin de construire des bases lunaires ou martiennes

ils ont besoin dans l'espace. » En attendant les humains sur Mars, la Nasa compte envoyer une imprimante 3D (plastique) sur la station spatiale internationale en 2014. Ce sera alors la première fois qu'une impression 3D sera réalisée dans l'espace. À l'avenir, la Nasa compte ainsi alléger les missions spatiales de longue durée en évitant d'emporter autant de pièces de rechange ou de fournitures pour les voyages dans l'espace profond.

Amaze

L'Agence spatiale européenne (ESA) a aussi des vues sur des tests d'impression 3D – métal cette fois – sur l'ISS (la station spatiale internationale), mais rien n'est encore décidé. En attendant, le projet Amaze, qui concerne la fabrication additive visant zéro perte et une production efficace de produits métalliques de haute technologie, a démarré en janvier. Il vise à développer les technologies de l'impression 3D métal à une échelle industrielle.

David Jarvis, responsable du département de recherche sur les énergies et les nouveaux matériaux à l'ESA, pense qu'à terme les technologies développées pour l'espace pourront servir aux autres industries : « Aujourd'hui dans l'espace, demain dans les voitures, les machines à laver ou les téléphones. »

Bâtiments en 3D

L'ESA fait des recherches afin d'augmenter la taille des pièces métalliques imprimées en 3D, précisément l'un des points durs de cette technologie. Le centre d'usinage par laser à Cranfield a ainsi réussi à créer une pièce en métal de 1,5 mètre de long et s'est fixé comme objectif une pièce de 2,5 mètres pour 2014.

La particularité des recherches des industriels de l'espace est qu'ils cherchent à utiliser ces méthodes dans des conditions très particulières : en microgravité, pour l'ISS, ou sur d'autres surfaces planétaires. Ainsi, la Nasa finance un projet au centre spatial Kennedy visant à utiliser des matières extraterrestres comme matière première afin de construire des infrastructures sur la Lune ou même Mars. ■

Des applications en amont des pièces finies

L'impression 3D trouve également des applications dans le domaine de la fonderie, donc bien en amont de la fabrication des pièces avionnées. Exemple, le groupe français Ventana utilise des moules de fonderie en sable fabriqués en impression 3D. L'intérêt : réduire le temps de développement des fonderies. Le groupe français maîtrise cette technique depuis déjà trois ans, et l'utilise tout particulièrement dans sa fonderie Messier, pour le moulage de pièces en magnésium.