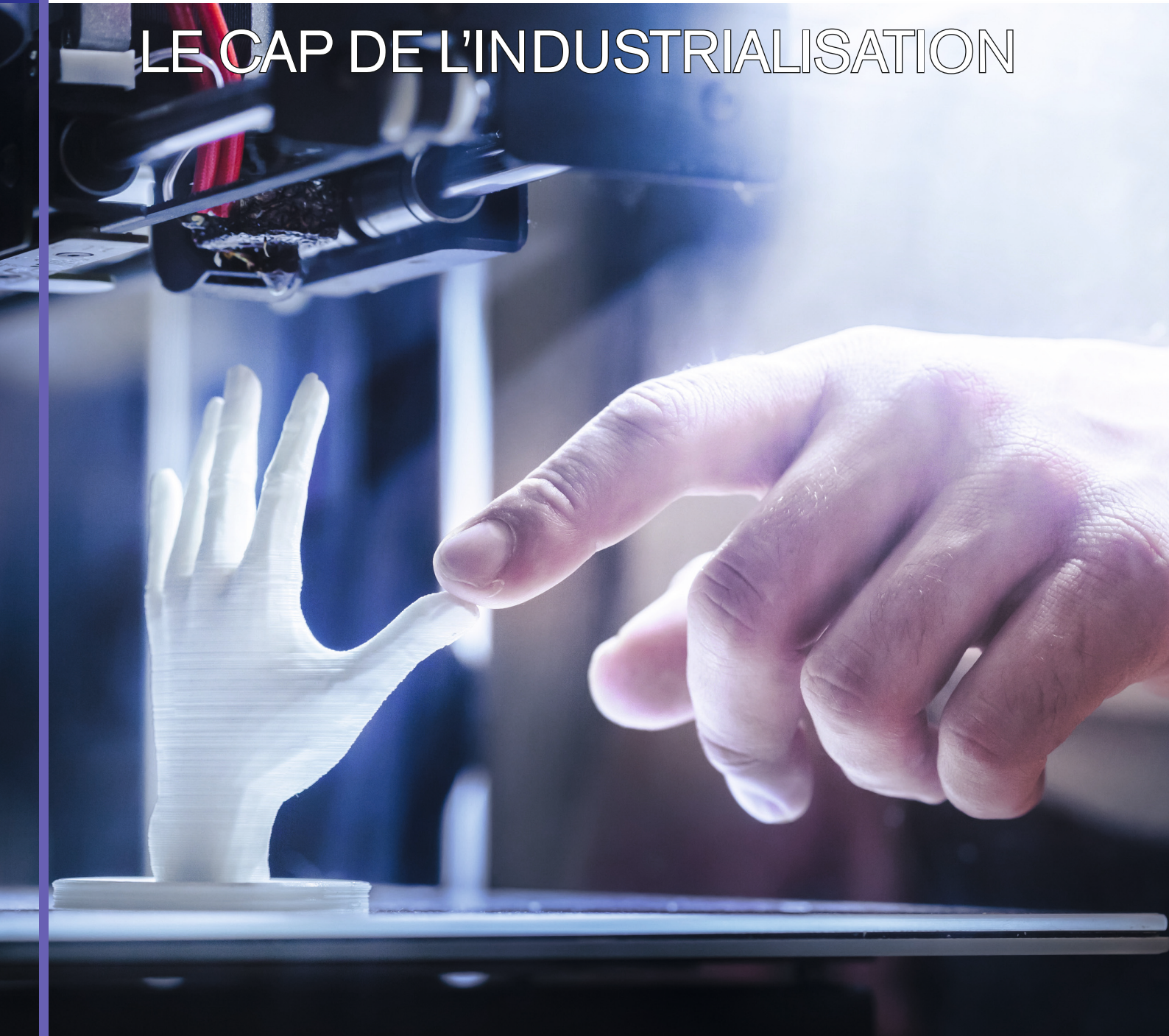
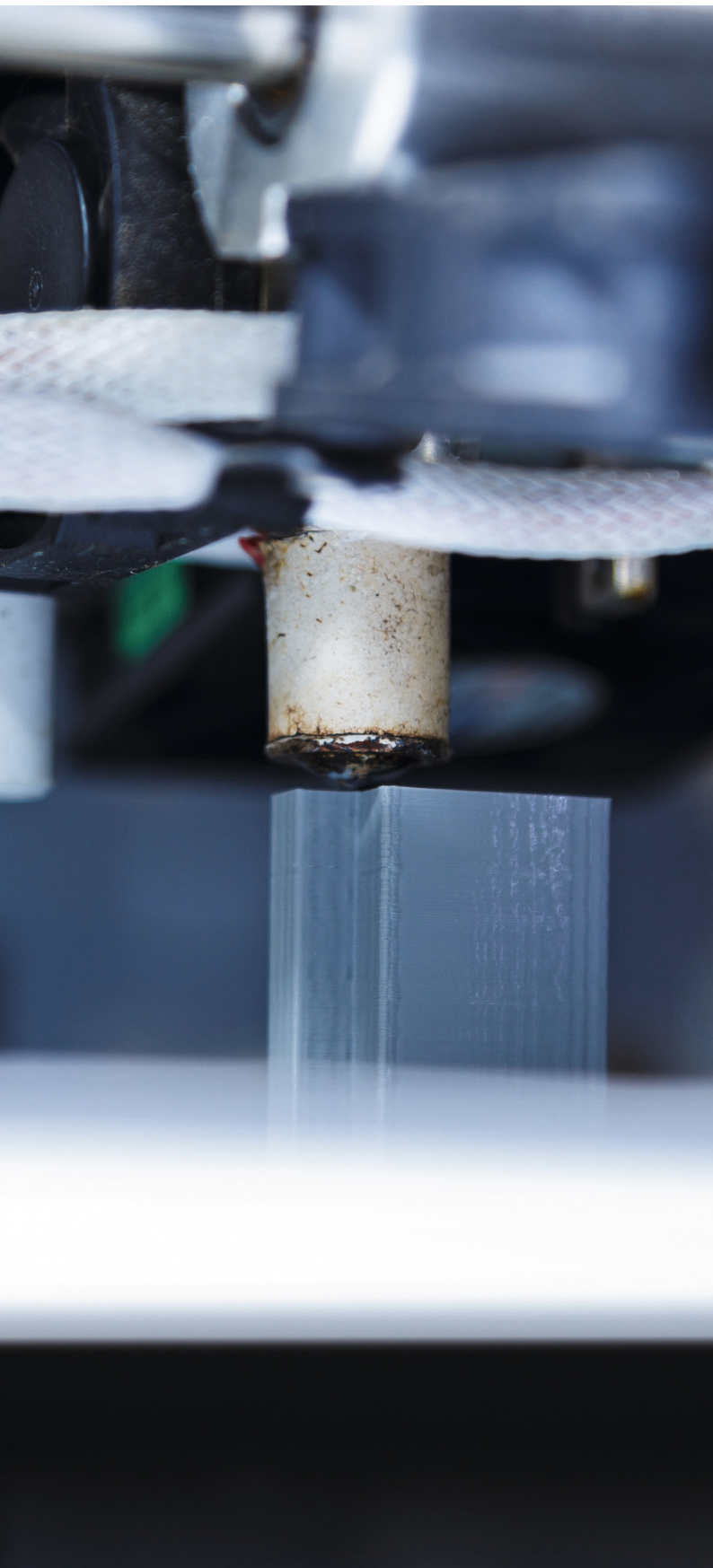


FABRICATION ADDITIVE : **LE CAP DE L'INDUSTRIALISATION**





SOMMAIRE

Introduction	p. 3
Des pièces sans soudure	p. 4
Un marché exponentiel	p. 4
Des applications concrètes	p. 5
Les challenges à relever	p. 5
Garantir la qualité.....	p. 6
L'importance du design.....	p. 7
Vers des imprimantes connectées.....	p. 7

Conclusion : une révolution est en cours	p. 8
---	------

3 Questions à...

André Surel	
EOS	p. 10
Bastien Martinez	
Ansys	p. 11
Emilien Goetz	
Altair	p. 12

Annexes	p. 13
• Les principales technologies de fabrication additive	
• Bibliographie	

Crédit photos : Fotolia sauf mentions contraires

Nos remerciements à Valentina Vetere

Les technologies d'impression 3D servent aujourd'hui essentiellement aux pièces de démonstration, marketing ou prototypes ou encore pour la fabrication de pièces de rechange à la carte, des pièces de rechange qui ne sont plus commercialisées. Mais du fait de leur besoin constant d'innovation et de quantités mesurées, les secteurs de l'aéronautique et du médical utilisent déjà amplement l'impression 3D, même si son coût reste élevé. Du côté de l'industrie automobile, les fabricants commencent aussi à s'y intéresser pour de la production finale : comme pour l'aéronautique, ils font de plus en plus face à des contraintes de poids et de normes anti-pollution. Le grand défi est à présent le développement d'un choix de matières plus large et plus fonctionnel ainsi que l'augmentation des vitesses de production et des capacités des machines. Autrement dit, il faut passer à une véritable industrialisation.

INTRODUCTION

La fabrication additive est une méthode de fabrication qui possède de nombreux avantages et en particulier la création de pièces complexes monobloc sans assemblage ni soudure et sans avoir recours à des outillages de fabrication. Mais elle a également des contraintes à ne pas sous-estimer.

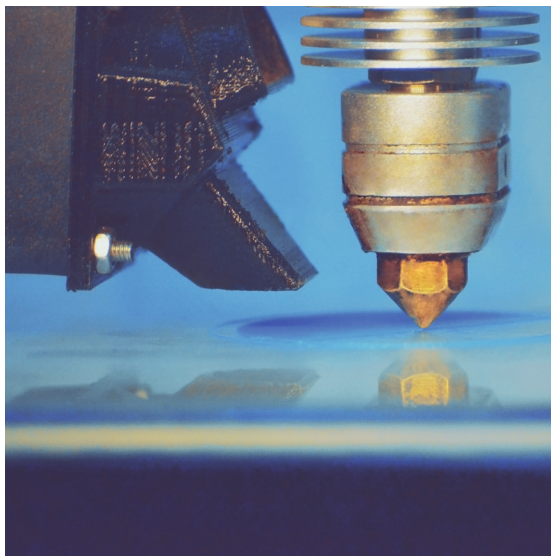
Connue aussi sous le nom d'**impression 3D**, cette méthode de fabrication a commencé à se développer dans les années 80. Elle désigne l'ensemble des procédés permettant de fabriquer une pièce par ajouts successifs de matière – d'où l'adjectif additif. Un modèle numérique est ainsi reproduit par des imprimantes qui réalisent une fabrication couche par couche de la pièce réelle.

Le 16 juillet 1984, le **1^{er} brevet** sur la fabrication additive est déposé par trois Français : Jean-Claude André, Olivier de Witte et Alain le Méhauté, pour l'entreprise Cilas Alcatel. Deux semaines plus tard, l'américain Chuck Hull brevète la technique de stéréolithographie (SLA pour StéréoLithographie Apparatus). Ce brevet est à l'origine du nom de l'extension du fichier d'impression .stl, et de l'entreprise 3D Systems, géant de la fabrication d'imprimantes 3D. Cette dernière lance, fin 1988, la première imprimante 3D, la SLA-250.

En 1995 apparaît la technologie d'impression 3D métallique DMLS, pour Direct Metal Laser Sintering. En 2003 apparaît le procédé de collage de feuilles de papier A4, le 3DPP, pour 3D Paper Printing. En 2005 naît la première imprimante couleur (entreprise ZCorporation), utilisant la quadrichromie comme les imprimantes classiques, et des pigments liés par de la colle à une matière minérale. L'année 2006 voit la naissance projet RepRap, premier projet open source d'imprimante 3D, par le Dr Adrian Browyer, alors professeur en génie mécanique à l'Université de Bath. Il ouvre la voie aux futures imprimantes domestiques, puisqu'il consiste à pouvoir construire par soi-même une imprimante 3D en technologie de dépôt de fil fondu. Il donne naissance à la culture maker.

C'est en 2011 qu'apparaît l'impression 3D alimentaire, à base de sucre ou de chocolat.

Le 16 juillet 1984, le 1^{er} brevet sur la fabrication additive est déposé par trois Français : Jean-Claude André, Olivier de Witte et Alain le Méhauté.



DES PIÈCES SANS SOUDURE

Cette méthode de fabrication possède de nombreux avantages, en particulier la création de pièces complexes monobloc sans assemblage ni soudure et sans avoir recours à des outillages de fabrication. Il est, par exemple, possible de fabriquer, en une seule étape, des pièces articulées ou qui intègrent plusieurs fonctions : réseaux fluide ou fonctions thermiques intégrés dans une pièce de structure. Il est également possible d'alléger les designs classiques grâce à des structures plus aériennes présentant des cavités (structures alvéolaires de type lattice), ou de réparer des pièces en ajoutant, de manière automatisée et contrôlée, de la matière uniquement aux endroits le nécessitant (fissures).

Les délais de mise à disposition des pièces sont également réduits dans la mesure où il n'est plus nécessaire de décomposer la fabrication de la pièce en multiples opérations complexes et de créer des outillages spécifiques. On réduit le temps de conception du process et de fabrication des outils associés.

En fonction des pièces, la fabrication additive permet donc **une réduction des coûts de fabrication** à travers la suppression des frais d'outillages et des opérations de montage, une optimisation de la matière engagée ainsi qu'une simplification du processus global : suppression de certains traitements thermiques, pas d'opérations multiples de tournage ni de fraisage.

UN MARCHÉ EXPONENTIEL

À la suite des premiers brevets définissant la technologie de stéréolithographie^{1,2} en 1984, la commercialisation d'imprimantes 3D s'est développée à partir de la fin des années 90, poussée par des applications de prototypage rapide. Depuis dix ans, la croissance de la recherche et du développement et le nombre de brevets et d'acteurs du marché sont exponentiels. Des études³ anticipent une multiplication par 4,9 du chiffre d'affaires de la fabrication additive à l'échelle mondiale pour atteindre la somme de **10,8 milliards de dollars d'ici à 2020**. Cette croissance se retrouve dans la majorité des secteurs de l'industrie tel que l'automobile, l'aérospatial, le médical, l'énergie ou l'électronique.

De nouvelles technologies de fabrication additive voient le jour chaque mois, avec des imprimantes de plus en plus rapides, permettant l'utilisation d'un panel de matériaux de plus en plus large : métaux, plastiques, céramiques, composites, cires, papier et ceci pour de nouvelles applications de production telles que la réalisation de produits finaux (fabrication rapide) ou la fabrication outillage.

Actuellement, ces technologies commencent à être utilisées également dans la phase de production d'un produit, même si elles se limitent aux productions de pièces en petites et moyennes séries. La fabrication additive s'insère également dans les phases de post-production du cycle de vie d'un produit, certaines technologies pouvant être utilisées pour réparer des pièces endommagées ou bien pour remplacer des pièces anciennes dont la production est terminée et les stocks épuisés.

Des études anticipent une multiplication par 4,9 du chiffre d'affaires de la fabrication additive à l'échelle mondiale.

¹ André J.-C., Le Mehauté A. et De Witte O., Dispositif pour réaliser un modèle de pièce industrielle, Brevet FR 2 567 668 – A1, Date de dépôt : 16-07-1984, date de publication : 17-01-1986.

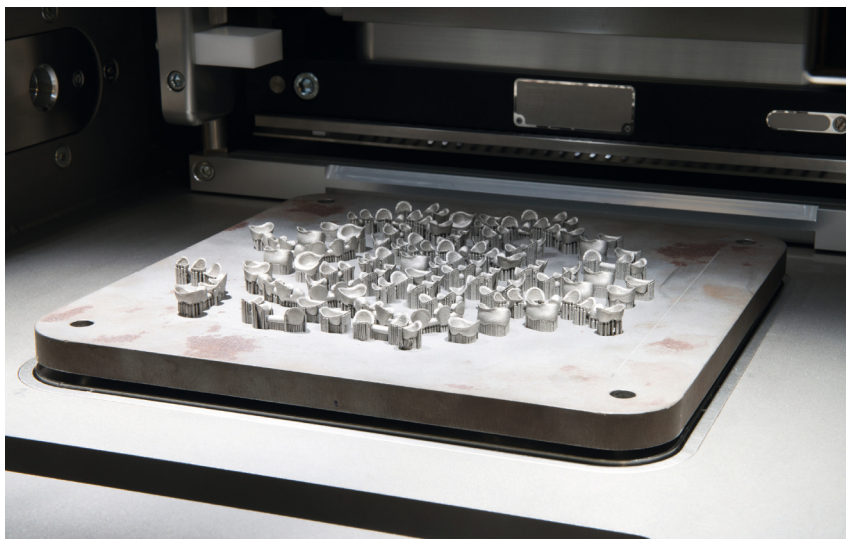
² Hull C.W., Method and apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography, Brevet EP 0 171 069 – A2, Date de dépôt : 08-08-1984, date de publication : 12-2-1986.

³ Verquin. Tour d'horizon des procédés de fabrication additive. In Journée Technique Blangy-sur-Bresle, 14/04/2014. CETIM, 2014.

DES APPLICATIONS CONCRÈTES

Les exemples d'application sont aujourd'hui nombreux, dans des domaines extrêmement différents. Dans le secteur médical, des substituts osseux sur mesure, des implants dentaires et des implants auditifs sont désormais réalisés en fabrication additive. Certaines sociétés se positionnent même sur la production de tissus et organes (Helisys, Ultimateker, and Organovo)⁴.

Dans le domaine aérospatial, Airbus⁵ a démarré l'utilisation de la fabrication additive pour son outillage, mais commence même à l'employer pour la fabrication de pièces finales : des premières pièces qualifiées en titane apparaissent à bord du satellite Atlantic Bird 7 et sur l'UAV Atlante, et de nouveaux composants sont à l'étude pour la nouvelle génération d'Airbus A350XWB. Safran réalise des pièces pour le moteur Silvercrest, et General Electric et Snecma⁶ (avec la joint venture CFM) utilise l'impression 3D pour le moteur LEAP.



Le secteur automobile, qui produit en grandes séries, utilise depuis de nombreuses années la fabrication additive pour fabriquer des prototypes et valider des concepts ou des outillages d'aide à la production. Désormais, la fabrication additive investit les usines de fabrication à travers des marchés de niches tel que la customisation, comme Koenigsegg qui réalise un grand nombre de pièces pour son modèle One : 1, ou l'outillage, comme Michelin⁷ qui utilise des moules réalisés en fabrication additive pour leur pneu cross climate.

LES CHALLENGES À RELEVER

Dans ce domaine passionnant et en plein développement, il reste de nombreux challenges sur lesquels les groupes de recherches universitaires et les bureaux de R&D se focalisent. Des exemples concrets de problématiques et développements en cours nous sont fournis par la fusion laser, l'une des technologies les plus utilisées pour les pièces métalliques.

Pour réussir dans ce domaine, il est primordial de pouvoir comprendre et contrôler la **relation métallurgique matériau-procédé-pièce**. Il est crucial, pour un matériau donné et une technologie d'impression choisie, de maîtriser de bout en bout le processus d'impression afin de garantir la qualité finale de la pièce fabriquée.

La connaissance et le contrôle des paramètres matériaux sont la clé du succès.

⁴ Lee Ventola, *Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses, Pharmacy&Therapeutics*, P T. 2014 Oct; 39(10): 704–711. PMID: PMC4189697

⁵ <http://www.airbusgroup.com/int/en/story-overview/factory-of-the-future.html>

⁶ MIT technology review : <https://www.technologyreview.com/s/513716/additive-manufacturing/>

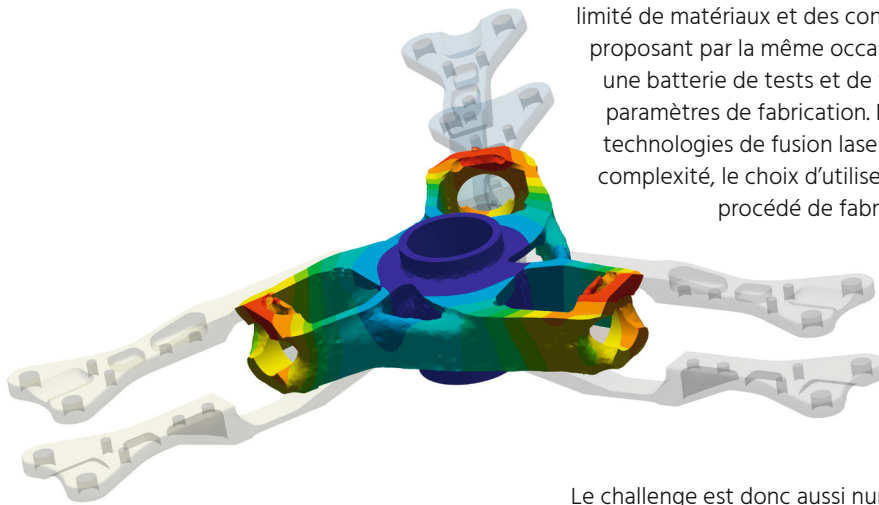
⁷ <http://www.lesechos.fr/industrie-services/automobile/021813674583-limpression-3d-monte-en-puissance-ches-les-grands-industriels-1211173.php>

Par exemple, pour l'impression de pièces métalliques par un procédé de fusion laser, il faut contrôler la vitesse, la puissance et la trajectoire du faisceau laser, l'orientation de fabrication, et bien d'autres paramètres afin de garantir, à chaque endroit du design, une parfaite maîtrise de la densité (porosité), de l'état cristallin, de la microstructure du matériau et de tout autre paramètre physique pouvant altérer les propriétés mécaniques de la pièce produite.

Un procédé de fabrication non maîtrisé, pour un couple poudre/machine, peut donner lieu à des pièces fragiles, non homogènes, anisotropes et éventuellement engendrer une perte de répétabilité.

La connaissance et le contrôle des paramètres matériaux sont la clé du succès. Pour cette raison, dans la stratégie de beaucoup de fabricants d'imprimantes, la commercialisation et la garantie de leurs machines sont associées à un choix limité de matériaux et des configurations de paramètres machine associés, proposant par la même occasion la vente de leurs poudres pour lesquelles une batterie de tests et de validation a été effectuée afin d'optimiser les paramètres de fabrication. Néanmoins, et toujours dans les cas des technologies de fusion laser, vis-à-vis de la forme de l'objet et de sa complexité, le choix d'utiliser des paramètres constants tout au long du procédé de fabrication, peut amener, par endroit, à des

singularités thermiques pouvant engendrer une diminution significative des propriétés mécaniques. Dans ce contexte, il pourrait être nécessaire d'adapter localement les paramètres du procédé (vitesse du laser ou stratégie de lasage), afin de contrôler la thermique de fabrication.



ANSYS

Le challenge est donc aussi numérique. La maîtrise du procédé nécessite le développement de logiciels capables de simuler la fabrication et optimiser les données locales pour assister les spécialistes des procédés.

GARANTIR LA QUALITÉ

La certification des pièces demande, par ailleurs, une maîtrise totale de la **traçabilité et de la qualité** – c'est-à-dire la capacité de rendre compte des paramètres retenus pour l'élaboration d'une pièce ou d'un composant. Capturer, gérer et utiliser les informations nécessaires, collectées depuis différentes sources et sous divers formats, est un travail extrêmement complexe.

Ensuite, il faut être en mesure d'analyser ces données pour générer une information utile et adapter le processus en fonction des évolutions de la machine après chaque série de tests. Pour la qualification des pièces, un contrôle dimensionnel et géométrique est dans tous les cas nécessaire. À celui-ci s'ajoutent des aspects métallurgiques et mécaniques⁸. A l'heure actuelle, la batterie de tests effectués en amont et en aval du procédé est assez coûteuse et nécessite parfois de s'adosser à des laboratoires privés ou publics afin de s'assurer que la pièce fabriquée réponde aux attentes.

Ainsi, suite à une fabrication de pièce, des **contrôles non destructifs** semblables à ceux réalisés en fonderie⁹ (ressuage, radiographie, ultrasons), voire mêmes des techniques telles que la tomographie, peuvent être menés

⁸ Joël Rosenberg, *L'impression 3D : Porte d'entrée dans l'industrie du 21e siècle*, étude CCI.

pour vérifier l'intégrité de la pièce. Des méthodes de **contrôle in situ** (i.e. pendant la phase de fabrication, afin de vérifier la qualité de la pièce couche par couche) sont en cours de développement et sont nécessaires pour ces technologies permettant de produire des formes complexes et difficilement analysables une fois l'objet terminé.

L'IMPORTANCE DU DESIGN

Un autre défi majeur, pour la maîtrise et l'exploitation de toutes les potentialités de cette approche novatrice, réside dans le design et l'accompagnement de l'ingénieur designer dans la remise en question de ses acquis et dans sa créativité. Plus simple à dire qu'à faire ! Quand le champ des possibles est infini, trouver le meilleur design, permettant de maximiser les fonctionnalités et les performances d'une pièce, n'est pas un travail anodin.

De nouveaux outils de conception voient le jour, avec une utilisation toujours plus importante des méthodes **d'optimisation topologique**. Les logiciels utilisant ces méthodes permettent, pour un volume donné, d'optimiser la répartition de la matière afin de répondre au mieux au jeu de contraintes imposées. Il en résulte des formes assez innovantes, monobloc, qui peuvent remplacer les anciens designs tout en respectant les spécifications de charges nécessaires.

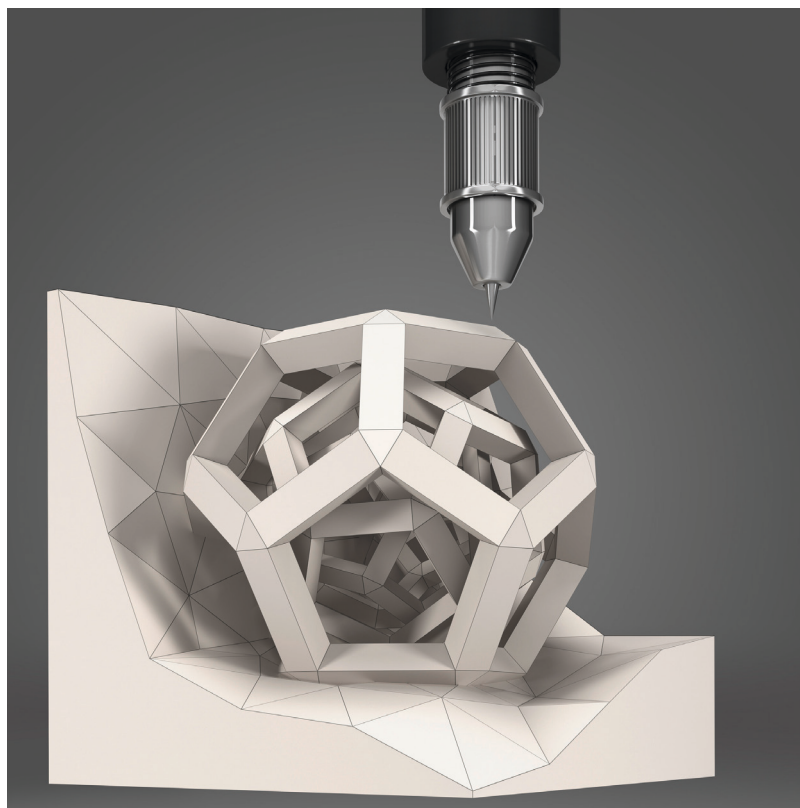
La méthode n'est pas nouvelle. Mais avant l'arrivée en masse de la fabrication additive, les formes proposées étaient la plupart du temps irréalisables selon les méthodes de fabrication classiques.

Cette approche est souvent utilisée en tant que première étape d'une chaîne de calculs successifs de design CAO : calcul d'optimisation structurale, de stress et de fatigue, jusqu'à la validation finale. D'importants gains de masse peuvent ainsi être envisagés grâce à ces approches (60 % en moyenne). Les méthodes utilisées aujourd'hui pour des optimisations de structure ne sont toutefois pas adaptées pour traiter l'optimisation des caractéristiques thermiques, électriques ou fluidiques sur les pièces. Des méthodes spécifiques doivent donc encore être développées.

De plus, le travail du designer se complique par l'intégration de nouvelles contraintes liées au procédé de fabrication. Pour chaque technologie, chaque imprimante possède ses propres tolérances, ses propres limitations de design (dimension, angles) et génère des caractéristiques métallurgiques de la pièce spécifiques.

Il est essentiel de tenir compte de ces paramètres dès la phase amont de la conception. Pour certaines technologies, il est nécessaire d'ajouter, au design voulu, des supports qui vont être enlevés lors du post-traitement, mais qui, durant la phase de construction de la pièce, seront nécessaires pour éviter un effondrement des plans horizontaux ou pour assurer un échange thermique. La position, la quantité et la forme de ces supports auront un impact crucial sur le prix, la qualité de la pièce finale et ses caractéristiques physiques.

Quand le champ des possibles est infini, trouver le meilleur design, permettant de maximiser les fonctionnalités et les performances d'une pièce, n'est pas un travail anodin.



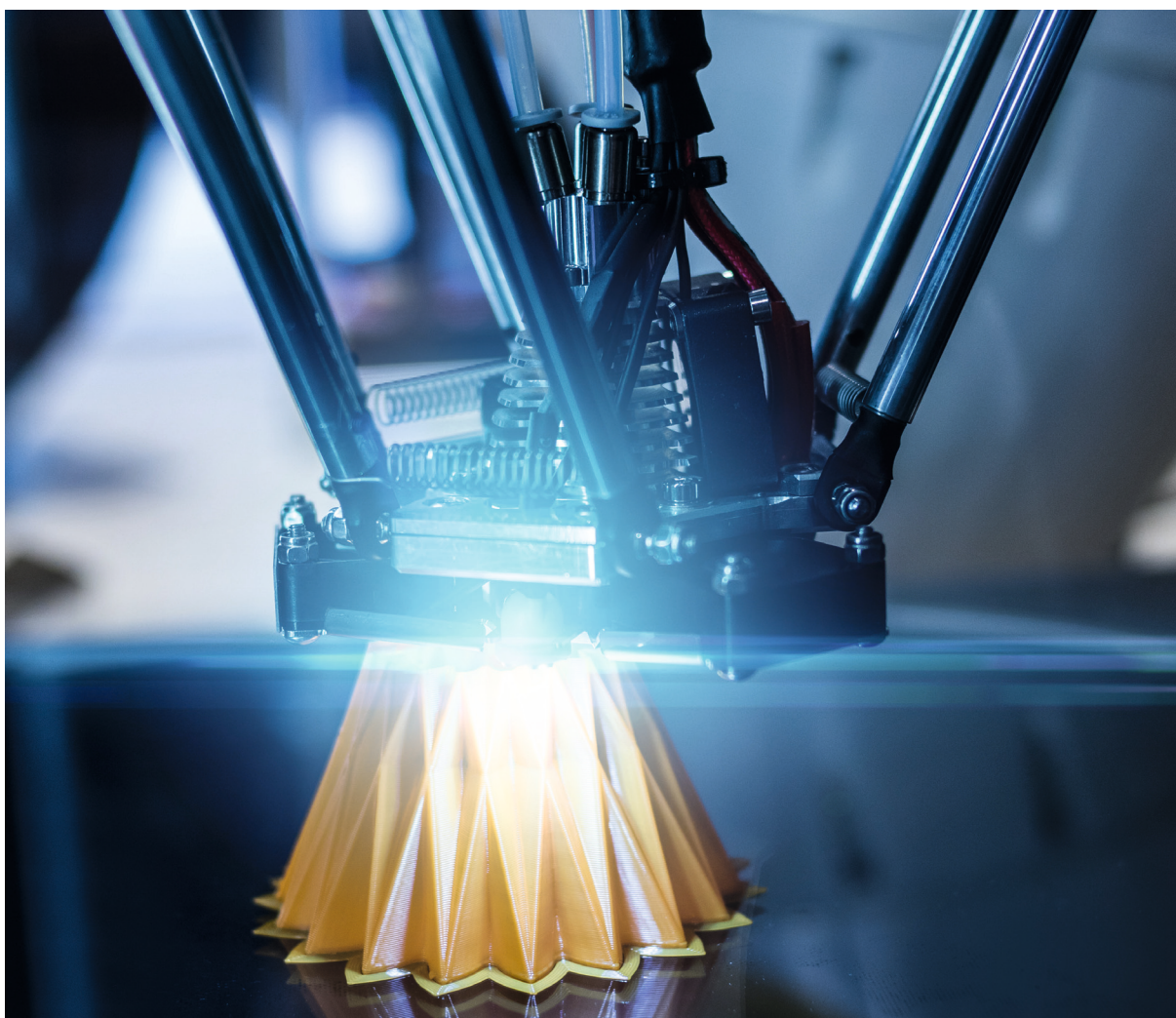
Les nouvelles imprimantes seront donc connectées et pilotées à distance.

VERS DES IMPRIMANTES CONNECTÉES

D'autres challenges attendent les équipes de R&D avec les nouvelles générations d'imprimantes, qui se doivent d'être plus rapides (faisceau d'électrons, multi-laser, multi-jets ou faisceau d'ions). Les procédés deviendront plus robustes, maîtrisés, qualifiés et avec une vision de leur intégration dans l'usine 4.0. Les nouvelles imprimantes seront donc connectées et pilotées à distance. Leur production sera maîtrisée via des planificateurs qui optimiseront à chaque étape la demande et le prix.

Du fait de la double complexité « *moyens à mettre en œuvre / géométrie à fabriquer* », des développements de logiciels complexes de FAO (fabrication assistée par ordinateur) sont nécessaires. Ceux-ci peuvent aller du logiciel le plus simple, qui se cantonnera à un découpage en tranches de la pièce et éventuellement une génération automatique de supports pour les parties en contredépouille, au logiciel le plus complexe pour la génération de trajectoires dédiées aux moyens de projection de poudre, ou le pilotage des trajectoires pour les imprimantes multi-têtes et multi-axiales⁹.

Ces logiciels nouvelle génération devront pouvoir être interfacés aux logiciels de design et intégrer des librairies de paramètres-process/qualité-matériaux afin d'optimiser la stratégie de fabrication et garantir la qualité finale tout en permettant d'en simuler les caractéristiques dès les phases de conception.



CONCLUSION : UNE RÉVOLUTION EST EN COURS

Il est difficile de prévoir ce qu'il adviendra dans le futur. Ce que nous savons, c'est que le monde passionnant de la fabrication additive ouvre la porte à une révolution dans l'industrie. La possibilité émerge de faire des produits allégés, des formes optimisées, ainsi qu'une possible réduction des temps et des coûts de production. Un vaste champ des possibles est à explorer, avec la nécessité d'une vraie transformation des métiers de l'industrie par des designers qui doivent acquérir de nouvelles compétences en procédés, des fabricants de machines de production qui doivent maîtriser l'approvisionnement et la qualification matériaux et en même temps contrôler la totalité de la chaîne du software au hardware. Les éditeurs logiciels de design et de production, pour leur part, auront à proposer des solutions non pas pour « /a » fabrication additive, mais pour « /es » fabrications additives. Ils contribueront ainsi à intégrer en amont les paramètres de design appropriés, la bonne chaîne de calcul pour chaque besoin et pour chaque technologie. Le travail collaboratif est la seule clef possible du succès.

3 QUESTIONS À...



ANDRÉ SUREL, DIRECTEUR EOS FRANCE :

« LE SILLON EST CREUSÉ, LES GRAINES SONT SEMÉES »

Quel procédé vous paraît le plus prometteur parmi ceux que vous proposez ?

La fusion laser de métal sur lit de poudre, baptisée chez EOS direct metal laser sintering, ou DMLS, a rapidement rejoint les demandes du secteur aéronautique et du médical, du fait des limites des solutions conventionnelles. Nous avons équipé le groupe Safran dès 2008. Le procédé rencontre son marché, avec des pièces complexes en quantités réduites, par rapport au secteur automobile. C'est donc sur ces secteurs que le procédé est pertinent. Le procédé participe, par ailleurs, à la nécessité de réduire les coûts, tout particulièrement dans l'aéronautique et permet de produire des pièces difficiles à réaliser en usinage, forge ou en fonderie, notamment en repensant parfois la conception des pièces vers plus d'intégration fonctionnelle.

La nécessité de repenser la chaîne de fabrication n'est-elle pas un frein au procédé ?

Tout dépend du point de vue adopté, selon que vous vous placez du côté du problème ou de la solution. General Electric s'est positionné du côté de la solution, dans sa filiale avec Safran qui s'appelle CFM, pour la production du moteur Leap. Les premières livraisons de ce nouveau moteur équipant l'A320 NEO, le Boeing 737 Max et le Comac ont eu lieu. Les injecteurs de kérosène sont fabriqués en additif, en grande partie sur des machines EOS. Leur démarche a été lancée il y a au moins 8 ans. L'exercice préalable a été de penser l'assurance qualité pour pouvoir qualifier les pièces auprès des services de l'aviation civile. Ils ont ajouté sur nos machines des solutions de surveillance du bain de fusion ou de recherche de défaut par caméra infrarouge, types de solutions que désormais nous proposons.



Le procédé est-il mature ?

Il arrive à maturité. Les injecteurs de kérosène en sont une preuve. Il ne s'agit pas encore de pièces critiques. L'industrie est en évolution constante. La fabrication additive concourt à l'usine du futur. Les voitures hybrides il y a 10 ans étaient-elles mures ? Techniquement oui, mais elles le sont devenues plus encore commercialement avec la possibilité de recharger les batteries. La tendance, en matière de fabrication additive, est lourde. Le sillon est creusé, les graines sont semées, la moisson viendra.

3 QUESTIONS À...



BASTIEN MARTINEZ, INGÉNIEUR SUPPORT TECHNIQUE CHEZ ANSYS : **« LA FABRICATION ADDITIVE LIBÈRE DES CONTRAINTES DE FABRICATION »**

Comment la 3D modifie-t-elle la conception des pièces ?

La fabrication additive ouvre des perspectives nouvelles en matière de conception. Au lieu de partir d'un design prédéfini, conditionné par un mode de fabrication conventionnel, nous modélisons un espace d'encombrement. Nos outils de simulation mécanique au travers de l'optimisation topologique permettent de générer une forme libérée de toutes contraintes de fabrication, dès lors qu'elle répond au cahier des charges. Une fois le design optimisé obtenu, notre outil géométrique Spaceclaim permet d'épurer la nouvelle forme de la pièce afin de s'assurer que son comportement répond aux critères. Cet outil permet également d'aller plus loin en proposant la modélisation de structure lattice.



Comment vos solutions logicielles s'interfacent-elles avec les imprimantes 3D ?

Spaceclaim génère des fichiers directement transférables vers une imprimante 3D. Par ailleurs, notre expertise en simulation numérique nous permet de savoir ce que la fabrication additive induit dans le comportement de la pièce.

Qu'est-ce qui distingue Ansys de ses concurrents en matière de fabrication additive ?

Ansys propose dans un même environnement logiciel différentes solutions permettant de maîtriser toutes la chaîne numérique : un outil géométrique, avec Spaceclaim, pour la conception et la rétro-conception, des outils de simulation mécanique en calcul de structure (thermique/statique/dynamique) et un outil d'optimisation topologique. Nous proposons un outil très avancé sur le plan géométrique en proposant du direct modeling. Autrement dit, une méthode qui permet au concepteur d'interagir directement avec la géométrie en « tirant », « déplaçant », « pliant » la matière. Cela nous permet de nous affranchir des contraintes de fabrication et donne libre cours au design. Autre point différenciant : nous possédons une gamme de produits assez complète pour traiter toutes les physiques : fluide, structure, électromagnétique ou semi-conducteurs. En utilisant toutes les performances des ordinateurs et grâce à des algorithmes de calcul robustes et optimisés, nous obtenons des résultats rapidement. Cette richesse d'outils au travers d'une plateforme intuitive et simple à appréhender permet de nous adresser à tous les ingénieurs, du non-expert à l'ingénieur confirmé.

3 QUESTIONS À...



**EMILIEN GOETZ, CHEF DE PROJET FABRICATION ADDITIVE FRANCE
CHEZ ALTAIR :**

« LA FORMATION DES ÉTUDIANTS COMMENCE À DEVENIR MÂTURE »

Que manque-t-il pour démocratiser la fabrication additive ?

Il manque avant tout des normes, des bases de données matériaux, améliorer la répétabilité, car les PME n'ont pas les moyens de réaliser une campagne d'essais complète pour chaque nouveau matériau et chaque nouvelle machine. Afin de réduire les coûts et rendre plus accessible la fabrication additive, il faut pouvoir assurer les caractéristiques des matériaux en sortie d'imprimante sans avoir à réaliser de contrôles supplémentaires très coûteux. Les imprimantes devront être capables d'indiquer par elles-mêmes à l'utilisateur si les pièces sont bonnes ou pas. Je pense également que de trop nombreux acteurs sont focalisés sur l'impression « directe » de pièces. Malheureusement, cette approche ne convient pas à de nombreuses industries, notamment l'automobile. De nombreuses industries trouveraient un plus grand intérêt à utiliser l'impression 3D de manière indirecte : réalisation d'outillages, couplage de l'impression 3D avec d'autres procédés de fabrications : fonderie ou injection en conformal cooling.



La formation des concepteurs est-elle suffisante ?

Les filières de formation des étudiants commencent à devenir matures, mais il reste un gros travail de formation des industriels. Je rencontre encore beaucoup de personnes qui pensent qu'utiliser un outil d'optimisation topologique comme Inspire est suffisant pour concevoir une pièce en ALM. Or, cela conduit deux fois sur trois à un échec. Il y a de nombreux autres aspects à prendre en compte : l'intégration de fonctions, les coûts de maintenance ou le délai d'approvisionnement. La connaissance globale des concepteurs sur les spécificités de la FA est encore trop faible en France. J'observe souvent trop souvent des initiatives de conception de pièces en FA uniquement parce que c'est tendance. En résulte un échec, car ces initiatives sont mal préparées. Il est nécessaire d'avoir un minimum de connaissance dans tous les domaines liés à la FA, en partant de la conception assistée, par l'optimisation topologique jusqu'aux aspects de traitement de surface pour être sûr de pouvoir en exploiter tout le potentiel.

Quelles sont les dernières mises à jour d'Inspire et Optistruct et qu'apportent-elles par rapport à vos concurrents ?

Le couplage des simulations cinématiques avec les optimisations permet de découpler les possibilités offertes par Inspire. Le concepteur est maintenant capable de prendre en compte beaucoup plus facilement tous les efforts provenant de la cinématique de ses assemblages et ainsi de s'assurer de la robustesse de ses conceptions. OptiStruct est également capable de générer des optimisations dites « fail safe » et permet de pallier à un des gros inconvénients des structures optimisées : la destruction complète d'une pièce si un bras venait à rompre. OptiStruct est maintenant capable de générer des designs assurant l'intégrité de la pièce quelle que soit la zone rompue. Ce type de design est très important dans l'aéronautique, en particulier.

LES PRINCIPALES TECHNOLOGIES DE LA FABRICATION ADDITIVE

- **Les technologies plastiques :**

La stéréolithographie (SLA) : est historiquement la première technologie développée pour l'impression 3D. Elle s'est répandue à la suite du brevet déposé par Charles W. Hull en 1984 qui fonda en 1986 la société 3D Systems, un des leaders mondiaux du marché de la fabrication additive. Le principe repose dans la photo-polymérisation, par un laser ultra-violet, couche par couche, d'une résine liquide placée dans une cuve.

Le dépôt de fil en fusion (FDM : Fused Deposition Modeling) : est la deuxième technologie historiquement développée. Son origine date de la fin des années 80, elle a été développée par le groupe Stratasys, un autre leader mondial du marché de la fabrication additive. Elle consiste à déposer un fil de polyamide, de polypropylène, ou d'ABS (thermoplastique) en fusion sur une pièce en cours de fabrication. Le diamètre du fil est généralement de l'ordre de 25 µm. C'est aujourd'hui la technologie la plus répandue pour le grand public. Elle est peu chère, relativement rapide mais nécessite la création de structures de support durant la fabrication afin d'éviter l'effondrement de la pièce aux endroits sensibles. Dans l'industrie, elle est particulièrement utilisée pour le prototypage rapide, pour de l'outillage, ou pour la réalisation de supports de communication.

Le jet de poudre (MJM : MultiJet Modelling) : Cette technologie, plus récente, est celle qui se rapproche le plus des imprimantes de type jet d'encre classiques. Un ensemble de buses dépose selon la technologie soit un liant couche par couche sur un lit de poudre soit directement une couche de résine qui va durcir avec le temps. Les propriétés mécaniques des pièces fabriquées sont généralement assez médiocres mais les imprimantes offrent le choix d'un grand nombre de couleur de matériaux, la possibilité d'imprimer un même objet en plusieurs couleurs et les pièces produites ont un excellent rendu. Cela en fait la technologie idéale pour les maquettes et support de communication.

Le frittage de poudre plastique (SLS : Selective Laser Sintering) : Cette technologie s'est fortement développée durant les années 2000. L'idée est ici de déposer une fine couche de poudre plastique de quelques dizaines de µm. Un faisceau laser vient ensuite chauffer la poudre localement afin de la fritter (sans atteindre la fusion totale). La pièce, placée sur un vérin, descend alors d'un cran et une nouvelle couche de poudre est appliquée. Cette technologie permet de créer des pièces avec une excellente précision et un très bon état de surface. Cependant le processus doit être particulièrement maîtrisé, car la présence du laser peut entraîner localement des déformations dues aux effets thermiques. Elle ne nécessite généralement pas l'utilisation de support car le bain formé par la poudre restante non frittée est généralement suffisant pour supporter la structure de la pièce. En revanche, il faut se laisser la possibilité de retirer la poudre restante pouvant être piégée dans les cavités. Ce procédé est aujourd'hui encore très utilisé, notamment pour le prototypage rapide.

- **Les technologies métalliques :**

Fusion/frittage de poudre métallique (SLM : Selective Laser Melting, DMLS : Direct Metallic Laser Sintering) :

Le principe est le même que pour le procédé SLS, sauf que l'on cherche à produire des pièces métalliques (alliages de titane, d'aluminium, de nickel ou acier inox). Pour cela, le laser employé est beaucoup plus puissant et la chambre d'impression est placée sous atmosphère inerte afin de limiter les risques d'oxydation. La poudre est chauffée par le laser, soit juste en-dessous du point de fusion (frittage), soit juste au-dessus (fusion). Atteindre la fusion complète peut généralement s'avérer nécessaire afin de réduire la porosité et améliorer les performances mécaniques de la pièce produite. Contrairement au SLS, l'utilisation de supports peut s'avérer nécessaire pour soutenir la structure de la pièce mais aussi pour aider à la diffusion thermique. Les effets thermiques sont un point capital de ce type de technologie car ils vont déterminer les propriétés mécaniques de la pièce produite. Maîtriser l'ensemble du procédé est ici capital pour permettre la fabrication de pièces finales de production. Il est aujourd'hui déjà utilisé dans ce but dans de nombreux secteurs (aéronautique, médical, énergie) ainsi que pour la réalisation d'outillages. Parmi les fabricants de machines, la société allemande EOS (Détentrice de la technologie DMLS) fait partie des principaux acteurs du marché.



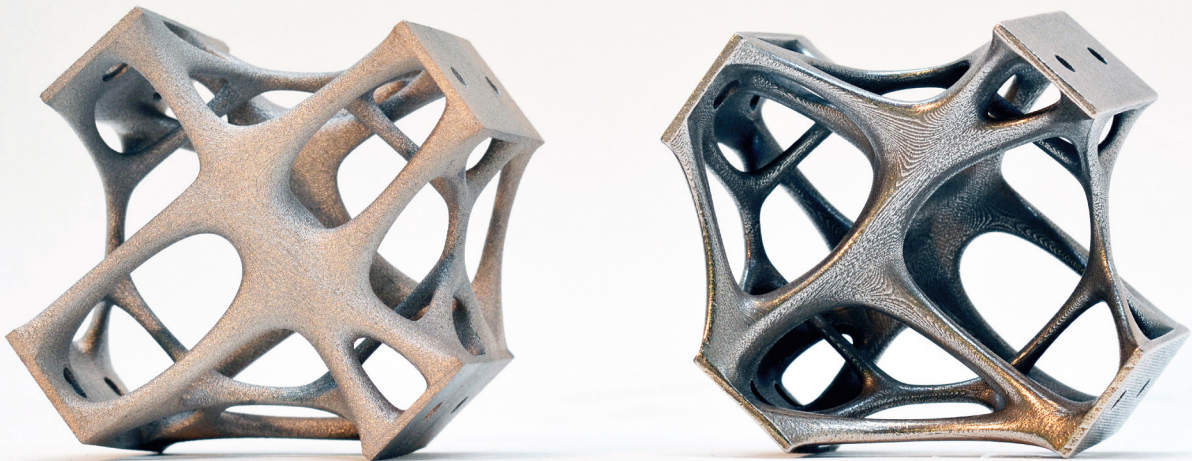
Fusion de poudre métallique par faisceau d'électron (EBM : Electron Beam Melting) : Ce procédé développé par la société suédoise Arcam repose sur le même principe que la fusion par laser sauf qu'un faisceau d'électron est utilisé comme source de chaleur à la place du laser. La fabrication est plus rapide, mais l'état de surface de la pièce fabriquée est légèrement moins bon. De plus, la chambre d'impression est préchauffée, ce qui limite les effets thermiques néfastes. Cette technologie est principalement utilisée pour imprimer des pièces à base d'alliage de titane.

Le dépôt de poudre (DED : Direct Energy Deposition) : Ce procédé couvre un vaste domaine de technologies (CLAD : Construction laser additive directe, LENS : laser engineered net shaping) assez similaires entre elles. Une buse placée au bout d'un bras robotisé, pouvant se déplacer selon 5 axes, dépose de la poudre qui est directement fondue par un faisceau laser placé sur ce même bras, sur la surface spécifiée et où elle va se solidifier. Bien que l'on puisse utiliser des polymères ou des céramiques, le procédé est généralement employé pour de l'impression métallique : soit pour la réalisation de grandes pièces de plusieurs mètres (pas de limitation due à la taille de la chambre d'impression de la machine), soit pour effectuer des réparations par ajout de matière. La génération de support n'est généralement pas nécessaire (rotation de la pièce) mais la précision atteinte et les états de surface sont généralement moins bons. La société française Beam a développé le CLAD, une des technologies les plus connues basées sur ce procédé.

Le dépôt de fil Métal (EBAM : Electron Beam Additive Manufacturing) : Développé par la société américaine Sciaky, ce procédé reprend les principes du dépôt de fil et du dépôt de poudre afin d'utiliser un bras robotisé pour déposer localement un fil métallique fondu par un faisceau d'électron. Cette technologie est principalement utilisée pour la réalisation de pièces de grande taille ou pour la réparation par ajout de matière.

BIBLIOGRAPHIE

- **Fabrication additive de pièces à base d'alliages métalliques complexes**, thèse d'Adnene Sakly, université de Lorraine, génie des procédés et des produits, février 2013
- **L'impression 3D**, 2014, Eyrolles, Paris
- **Fabrication Additive Métallique, technologies et opportunités**, INSA et NAE, avril 2015
- **Fabrication additive**, AFNOR éditions, février 2016
- **Fabrication additive, du prototype rapide à l'impression 3D**, Claude Barlier, Alain Bernard, Dunod, 2016
- **FDM, À propos de la modélisation par dépôt de fil en fusion (FDM)**, Stratasys, 2016





12, place Georges Pompidou 93167 Noisy-le-Grand cedex

Tél. : 01 45 92 96 96 – www.manufacturing.fr