

Paris, le 22 mars 2018

L'IMPRESSION 3D

Parlementaire référente :

- Mme Huguette Tiegna, députée, vice-présidente de l'OPECST

Membres du conseil scientifique de l'OPECST consultés :

- M. Patrick Netter, membre de l'Académie nationale de médecine ;
- M. Antoine Petit, professeur des universités, PDG du CNRS ;
- M. Guy Vallancien, membre de l'Académie nationale de médecine et de l'Académie nationale de chirurgie ;
- M. Marcel Van de Voorde, professeur à l'université technologique de Delft.

Autres experts consultés :

- M. Raymond Ardaillou, membre du comité national des sciences physiologiques ;
- M. Philip Boucher, administrateur au service de prospective de l'Office d'évaluation des options technologiques et scientifiques (*Science and Technology Options Assessment*) du Parlement européen ;
- M. Arnault Coulet, directeur de l'agence Fabulous
- M. Didier Fonta, directeur commercial de Pollen AM
- M. Benoit Furet, enseignant-chercheur à l'université de Nantes, responsable scientifique du projet Batiprint3D ;
- M. François Sillion, directeur général délégué à la science de l'INRIA.

Contributions :

- Service enseignement supérieur, recherche et innovation de l'ambassade de France au Royaume-Uni ;
- Service pour la science et la technologie et service économique régional de l'ambassade de France aux États-Unis ;
- Service pour la science et la technologie de l'ambassade de France en Allemagne ;
- Service pour la science et la technologie de l'ambassade de France aux Pays-Bas ;
- Service pour la science et la technologie de l'ambassade de France en Inde ;
- Académie des technologies.

Secrétariat de l'Office :

- M. Daniel Bokobza, conseiller ;
- M. Olivier Dussouillez, élève-ingénieur, stagiaire ;
- M. Vincent Jourdain, étudiant de master 2 en sciences politiques, stagiaire.

Cette note de synthèse, qui s'inscrit dans une nouvelle orientation des productions de l'Office au moyen de « notes courtes », traite des techniques d'impression 3D, également dénommée « fabrication additive » (I), de leurs enjeux industriels (II) et de santé publique (III), et des interrogations soulevées par leur usage domestique, notamment du point de vue de la propriété intellectuelle et de la sécurité des personnes (IV), pour finir avec quelques perspectives et préconisations (V).

I. QU'EST-CE QUE LA FABRICATION ADDITIVE ?

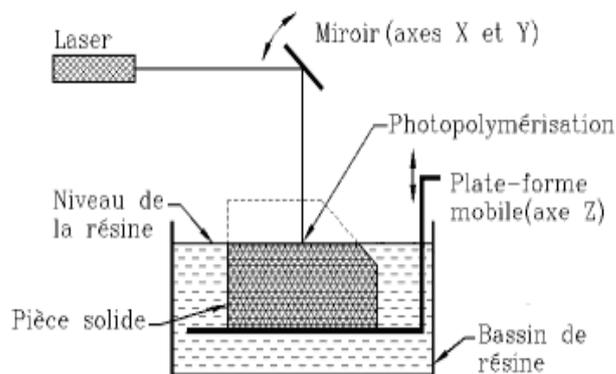
A. UN CONCEPT, PLUSIEURS PROCÉDÉS ET TECHNOLOGIES

Contrairement aux méthodes d'usinage classiques (fraisage, découpage, etc.), qui permettent la fabrication de pièces par enlèvement de matière, la fabrication additive d'une pièce repose sur l'ajout de matière, couche par couche, selon les spécifications définies dans un « modèle 3D » numérique. La fabrication additive se distingue également de l'injection thermoplastique par moulage, qui est une méthode de fabrication fortement utilisée pour la production en grande série.

Issue des travaux de recherche des Français Alain Le Mehauté, Olivier de Witte et Jean-Claude André, la première technologie de fabrication additive ou d'« impression 3D » a été inventée en 1984 ⁽¹⁾. Ceux-ci n'obtiendront néanmoins jamais le brevet de leur invention, « la stéréolithographie », leur direction de l'époque à la Compagnie générale d'électricité ⁽²⁾ et au CILAS ⁽³⁾ ne souhaitant pas engager des frais dans le processus de dépôt de brevet.

PRINCIPE DE LA STÉRÉOLITHOGRAPHIE

Un modèle 3D réalisé par acquisition numérique ou par conception assistée par ordinateur (CAO) est virtuellement découpé par un logiciel de tranchage (slicer), qui définit les paramètres d'impression : nombre de couches, épaisseur (fixe) des couches, quantité de matière, vitesse d'impression, etc.



Source : université de Reims.

L'imprimante stéréolithographique est composée d'une cuve remplie d'une résine liquide sensible aux rayons ultra-violet (UV). Selon les instructions d'impression transmises par le logiciel de tranchage, l'imprimante dirige des rayons UV émanant

(1) On constate, ici comme pour d'autres technologies, un mauvais positionnement de la France sur l'échelle « TRL » (Technology readiness level) d'évaluation du degré de maturité.

(2) Devenu Alcatel-Alsthom (1991), puis Alcatel (1998) et Alcatel-Lucent (2006), avant son rachat par Nokia (2016).

(3) Compagnie industrielle des lasers.

d'un laser pour solidifier des points précis de la surface émergée de résine. L'ensemble de ces points solidifiés, les « voxels » ⁽¹⁾, va constituer une couche de l'objet imprimé. Une plate-forme mobile sur laquelle s'appuie la résine solidifiée va ensuite se déplacer vers le bas, de manière à laisser émerger l'épaisseur d'une couche de résine liquide. Ces étapes se répètent jusqu'à ce que chaque couche constituant l'objet soit imprimée.

La même année, l'américain Charles W. Hull, aujourd'hui considéré comme le père de l'impression 3D, dépose un brevet pour une invention similaire et en obtient la délivrance en 1986. Il fonde alors 3D Systems, première société au monde à commercialiser des imprimantes 3D.

Si les premières machines étaient très lentes, coûteuses et contraignantes (en termes de dimension des pièces imprimables, de diversité des matériaux utilisables, etc.), les techniques d'impression 3D ont depuis beaucoup évolué.

Il existe à ce jour une centaine de fournisseurs de systèmes d'impression 3D dans le monde, des dizaines de technologies de fabrication additive (dépôt de fil, frittage par laser sélectif, stéréolithographie, etc.), sept principes de fonctionnement ⁽²⁾, plus de 200 types de matériaux utilisables en impression 3D (plastiques, métaux, céramiques, etc.). Certaines machines permettent d'utiliser différents matériaux de même nature lors d'une même impression. Les techniques disponibles permettent d'imprimer des objets mesurant de quelques centimètres à quelques mètres.

LES SEPT PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT ACTUELS DE LA FABRICATION ADDITIVE

Nom du principe	Description ou exemple de technique
Projection de liant	Un liant est projeté, selon le modèle 3D, sur un lit de poudre pour créer une couche. Une fois la couche terminée, une nouvelle épaisseur de poudre est déposée sur le lit.
Extrusion de matière	Un matériau (par exemple un thermoplastique) est fondu puis poussé à travers une buse d'application (un peu à la manière d'un pistolet à colle).
Dépôt énergétique direct	Une buse projette de la poudre (généralement métallique) et la fait fondre (souvent grâce à un laser).
Fusion d'un lit de poudre	Un peu à la manière de la « projection de liant », certaines régions d'un lit de poudre (définies par le modèle) sont fusionnées par un faisceau laser ou d'électrons.
Projection de matière	Des fines gouttelettes de résine photosensible sont projetées. Au fur et à mesure de sa projection, la résine est polymérisée (solidifiée) grâce à une lampe UV.
Photopolymérisation	Voir l'encadré sur la stéréolithographie, qui est une technique de photopolymérisation.
Laminage par dépôt sélectif (ou stratoconception)	De fines feuilles d'un matériau sont découpées puis collées ensemble pour former une pièce, à la manière des contre-plaqués.

Source : <https://www.gao.gov/products/GAO-15-505SP>, juin 2015.

B. L'IMPRESSON 3D OFFRE DES SOLUTIONS TECHNIQUES COMPLÉMENTAIRES AUX METHODES CLASSIQUES D'USINAGE OU D'INJECTION

Historiquement, l'impression 3D a beaucoup été utilisée pour le prototypage rapide de produits. Ne nécessitant pas d'outillage, l'impression 3D permet de produire des pièces à faible coût tout en réduisant les délais. Elle permet, contrairement à l'injection, de s'abstenir

(1) L'équivalent d'un pixel en 3D.

(2) Outre le principe de fonctionnement, d'autres critères peuvent être employés pour classer les procédés d'impression 3D : le type de matériau utilisé (fluide, poudre, solide) ou encore la source d'énergie permettant l'impression (action mécanique, rayons UV, etc.).

de créer des moules longs et coûteux à fabriquer. Le concepteur peut facilement faire évoluer ses prototypes (en modifiant le modèle 3D) et ainsi travailler de manière itérative.

• **Si certaines filières industrielles continuent d'utiliser massivement les techniques d'impression 3D à des fins de prototypage ⁽¹⁾, ces dernières s'introduisent aussi dans la conception de produits finaux du fait de leurs avantages techniques par rapport aux approches traditionnelles.**

L'impression 3D est particulièrement utile pour produire des pièces ayant des géométries complexes, parfois inspirées de formes observées dans la nature (bio-mimétisme). Si la complexité des pièces induit, le plus souvent, un surcoût et une difficulté de production élevés en usinage classique, ce n'est pas le cas en impression 3D. Il arrive d'ailleurs que l'impression 3D soit la seule technique possible pour réaliser de telles pièces. L'impression 3D peut rendre bon marché la production de pièces uniques et de petites et moyennes séries.

En outre, des imprimantes (telles que celles de l'entreprise française Pollen AM), **permettent de réaliser des pièces multi-matériaux en fabrication additive. Cela peut leur donner des propriétés fonctionnelles intéressantes**, par exemple une flexibilité variable. La technologie de certaines imprimantes (Pollen AM) utilise directement des matériaux industriels, permettant ainsi de produire au coût de la grande série.

Enfin, **l'impression 3D peut permettre, dans certains cas, de réduire drastiquement le nombre de pièces nécessaires à la réalisation d'un produit et donc de simplifier la conception.**

OBJETS EN POLYMÈRES SYNTHÈSE COMPARATIVE DE QUELQUES TECHNIQUES DE FABRICATION

	Impression 3D				Méthodes classiques			
	SLA	FSL	PDM	DMF	MOCN	Injection Plastique	Formage	Assemblage
Coût à volume faible	***	***	***	***	**	.	.	.
Coût à volume élevé (*)	***	***	**
Délais (**)	***	***	***	***	***	.	.	.
Panel de matériaux	**	**	**	**	***	***	***	***
Etat de surface	**	**	**	.	***	***	***	***
Tolérance	***	**	***	.	***	***	***	***
Assemblage intégré	***	***	***	***
Complexité	***	***	***	***	**	**	.	.
Personnalisation	***	***	***	***	***	.	.	.

*** : bon ; ** : moyen ; . : mauvais.

SLA : Stéréolithographie ; FSL : Frittage sélectif laser; PDM : Projection de matière ; DMF : Dépôt de matière fondue ; MOCN : Machine-outil à commande numérique

(*) De faibles coûts lors de la production de volumes élevés de pièces traduisent des économies d'échelle du fait d'importants rendements.

(**) Les délais correspondent au temps nécessaire pour produire la première pièce (par comparaison avec les délais des méthodes classiques, par exemple jusqu'à 60 jours pour certaines méthodes d'usinage classiques du fait de la fabrication des moules, de la mise en place des installations, etc.).

Source : Sculpteo.

(1) Par exemple, selon le rapport « Global Additive Manufacturing Market, Forecast to 2025 » publié par le cabinet Frost & Sullivan en 2016, l'impression 3D est utilisée dans l'industrie automobile à 90 % pour prototyper et à 10 % pour la production effective.

• Pour autant, la fabrication additive n'a pas vocation à remplacer les méthodes d'usinage classiques.

En effet, l'impression, en grandes séries, de pièces n'est, à ce stade, pas économiquement viable. Par exemple, les rendements des imprimantes 3D réalisant des pièces en acier sont bien en-deçà de ceux des procédés classiques de production de pièces.

Par ailleurs, la fabrication additive est parfois inadaptée aux besoins de la mécanique de précision. Selon un rapport⁽¹⁾ de l'*US Government Accountability Office* (GAO), la qualité des parties fonctionnelles des pièces imprimées en 3D dépend de nombreux facteurs (température, matériaux, machines, pratiques de fabrication, etc.). En conséquence, le respect des exigences fonctionnelles des pièces imprimées en 3D (tolérances, état de surface, résistance des matériaux, etc.) peut être variable.

Enfin, il est très souvent nécessaire de parachever l'impression 3D de pièces en métal ou en plastique par des opérations d'usinage, de ponçage ou de polissage pour améliorer la qualité des surfaces.

Ainsi, globalement, les techniques d'impression 3D viennent en complément des méthodes classiques de fabrication et ouvrent de nouvelles possibilités de production. Naturellement, il appartient à l'industriel de sélectionner les procédés les mieux adaptés à ses besoins au regard de ses exigences en termes de coûts, délais, qualité, complexité du produit, etc.

C. LES CHAMPS D'APPLICATION DE L'IMPRESSION 3D

Du fait des avantages de la fabrication de prototypes et de pièces par impression 3D, les techniques de fabrication additive sont utilisées dans l'ensemble de l'industrie (aérospatial, électronique grand public, industrie alimentaire, industrie maritime⁽²⁾, industrie du luxe⁽³⁾, etc.) voire parfois par des artisans (chocolatiers, joailliers, etc.).

Outre l'industrie, les particuliers peuvent eux aussi utiliser certaines techniques d'impression 3D, soit à leur domicile⁽⁴⁾, soit dans les « fab-labs », lieux collaboratifs ouverts au public et équipés de machines et d'outils permettant de concevoir et réaliser toutes sortes d'objets.

Enfin, la bio-impression de tissus en 3D et, plus généralement, les innovations médicales permises par la fabrication additive, méritent une attention particulière (voir *infra*).

II. ENJEUX LIÉS À L'USAGE INDUSTRIEL DE L'IMPRESSION 3D

L'impression 3D est particulièrement développée dans le monde industriel. Du fait des possibilités permises par les imprimantes 3D, celles-ci se sont progressivement imposées comme un excellent outil de prototypage et s'intègrent progressivement dans la fabrication de

(1) <https://www.gao.gov/products/GAO-15-505SP>

(2) Une hélice de bateau imprimée en 3D vient d'être homologuée aux Pays-Bas pour être utilisée pour la navigation.

(3) Par exemple, l'impression 3D est un outil très apprécié de certains créateurs du secteur de la haute couture : <https://www.industrie-techno.com/la-haute-couture-s-empare-de-l-impression-3d.50395>

(4) Certaines imprimantes 3D d'entrée de gamme coûtent moins de 200 euros.

produits finaux. Ainsi, l'impression 3D est répandue dans de nombreux secteurs dont les principaux sont présentés ci-après.

A. PRINCIPAUX SECTEURS INDUSTRIELS

1. Électronique grand public

L'impression 3D offre des solutions nouvelles aux concepteurs d'électronique et pourrait, à moyen terme, s'intégrer massivement aux circuits des appareils industriels et de grande consommation.

Outre la possibilité ouverte par la fabrication additive de concevoir des éléments de circuits électroniques en trois dimensions – ce qui peut potentiellement avoir un intérêt pour des problèmes d'ingénierie particuliers –, **l'impression 3D rend possible la fabrication de composants électroniques flexibles.**

Par exemple, le fabricant de semi-conducteurs American Semiconductor et le laboratoire Air Force Research Laboratory développent la technologie « *Flex Silicon-on-Polymer* », qui consiste à imprimer une encre électronique sur une fine couche de silicium, elle-même recouvrant une feuille de polymère. Le circuit dessiné par l'encre relie des microcomposants imprimés en 3D et positionnés sur la couche de silicium. Du fait de la finesse des composants imprimés, la technologie « *Flex Silicon-on-Polymer* » permet ainsi de réaliser des senseurs et des microcontrôleurs ⁽¹⁾ flexibles.

Les applications de cette technologie peuvent être nombreuses, en particulier dans le domaine des objets connectés portatifs (les *wearables*) ⁽²⁾, un marché à fort potentiel. De tels senseurs et microcontrôleurs pourraient, à titre d'exemples, être utilisés dans la conception de tissus connectés ou pour réaliser des *wearables* médicaux posés sur la peau.

2. Aérospatial

L'impression 3D est de plus en plus utilisée dans le secteur aérospatial, du fait des avantages compétitifs qu'elle procure. Néanmoins, selon l'Académie des technologies, le nombre de pièces imprimées en 3D intégrées dans les produits finaux demeure extrêmement faible.

L'impression 3D est tout d'abord utilisée pour réaliser des nombres relativement faibles de pièces à haute valeur ajoutée ayant des profilés ou des caractéristiques géométriques très spécifiques.

Les turboréacteurs LEAP produits par CFM International ⁽³⁾ et équipant les avions Airbus A320neo, Comac C919 et Boeing B737 MAX4 en constituent un exemple particulièrement illustratif.

(1) Un microcontrôleur est un circuit intégré comprenant à la fois un microprocesseur mais aussi d'autres composants essentiels à un ordinateur : mémoires (vives et mortes), interfaces d'entrées-sorties, etc.

(2) Aucun équivalent en français ne semble émerger.

(3) CFM International est une coentreprise détenue à 50 % par le français Safran et à 50 % par l'américain GE Aviation.

Parmi les innovations du LEAP, les 19 buses de ce moteur sont imprimées en 3D. Ces buses nécessitent des géométries très complexes pour assurer le bon mélange de l'air et du carburant dans le moteur. Grâce à l'impression 3D, les buses sont réalisées en une seule pièce, contre 20 pièces pour celles fabriquées par des méthodes d'usinage classiques. De plus, en raison de leur facilité de fabrication, les buses imprimées en 3D sont 25 % plus légères que celles usinées et cinq fois plus résistantes à la température. CFM International estime que ce choix technologique induit une réduction du coût d'exploitation de 3 millions de dollars américains par avion équipé du LEAP et par année ⁽¹⁾, du fait des économies de carburant ⁽²⁾ et de maintenance ⁽³⁾.

Citons aussi les travaux sur Prometheus, moteur réutilisable destinés à équiper les lanceurs spatiaux européens à partir de 2030. L'impression 3D pourrait permettre de diviser par dix ⁽⁴⁾ le coût de production du moteur (par rapport au moteur Vulcain qui équipe les fusées Ariane actuellement) en réduisant significativement les coûts d'assemblage.

La fabrication additive pourrait également constituer une voie pour réduire les besoins en stockage des constructeurs du secteur aérospace.

Selon le cabinet de conseil EY ⁽⁵⁾, Airbus estime que les changements de pièces pour ses modèles d'avion A300 et A310 s'effectueront jusqu'en 2050. Néanmoins, Airbus stockait déjà 3,5 millions de pièces à cet effet en 2014. Avec la généralisation de l'usage de l'impression 3D, les stocks pourraient être réduits au strict nécessaire : il n'y aurait alors plus besoin de stocker ni pièces ni outillages spécifiques. En effet, l'impression pourrait se faire à la demande, le plus souvent à partir de poudres métalliques faciles à entreposer.

Enfin, l'impression 3D permet des applications spécifiques aux besoins du secteur spatial.

La station spatiale internationale est équipée d'une imprimante 3D fabriquée par le groupe français Altran ⁽⁶⁾. Ainsi, des pièces de rechange peuvent être directement fabriquées dans la station après téléchargement des modèles 3D. La station peut donc continuer à être opérationnelle, sans qu'aucun ravitaillement ne soit plus nécessaire.

3. Mobilité

Dans l'automobile, comme on l'a vu, l'usage de l'impression 3D est principalement cantonné au prototypage ou à la production d'outils. La fabrication additive est en revanche peu utilisée dans les produits finaux.

Les sociétés Local Motors et Cincinnati ⁽⁷⁾ ont néanmoins démontré la faisabilité de réaliser une carrosserie de voiture par impression 3D et, ce, en seulement 44 heures et 212 couches. **Cela prouve qu'il est possible de développer des micro-usines automobiles**

(1) <https://3dprint.com/127906/ge-smart-factory/>

(2) *Les économies de carburant sont liées à la légèreté des buses de même qu'à une meilleure maîtrise du mélange air-carburant, étant donné la structure interne plus complexe des buses imprimées en 3D par rapport à celles fabriquées de manière classique.*

(3) *Les buses étant plus résistantes.*

(4) <https://www.la-croix.com/Sciences/Sciences/Limpression-3D-pourrait-diviser-cout-moteurs-dAriane-2017-01-23-1200819385>

(5) EY's Global 3D printing Report 2016.

(6) https://www.sciencesetavenir.fr/high-tech/premiere-impression-3d-dans-l-espace_36136

(7) <https://www.3dnatives.com/local-motors-imprime-3d-sema-05112015/>

généralant peu de déchets et assurant des livraisons rapides de véhicules produits directement dans les zones urbaines. Les capacités de production de telles usines seraient néanmoins nettement inférieures à celles des grands groupes automobiles, ces derniers produisant à des cadences bien plus élevées, à ce jour.

Si l'impression 3D est encore peu employée dans les produits automobiles, les travaux de recherche des grands groupes du secteur démontrent cependant que les technologies de l'impression 3D peuvent conduire à des ruptures technologiques.

Par exemple, Michelin étudie la possibilité d'intégrer la fabrication additive dans ses pneumatiques ⁽¹⁾. Dans son concept de pneu du futur « Vision », Michelin envisage un pneu sans air basé sur une structure alvéolaire imprimée en 3D. Grâce à l'impression 3D, le pneu serait modifiable en fonction des besoins du client : il pourrait par exemple être sculpté dans une station Michelin pour être adaptée à la conduite sur neige pendant une semaine.

En ce qui concerne le secteur ferroviaire, la fabrication additive est identifiée comme une opportunité pour réduire les stocks de pièces.

Par exemple, 30 % des pièces de SNCF Mobilité pourraient, à terme, être imprimées en 3D ⁽²⁾, ce qui aurait un impact considérable sur les besoins en stockage de l'entreprise.

4. Bâtiment et travaux publics (BTP)

Enfin, l'impression 3D pourrait être un moyen privilégié pour moderniser la filière BTP.

En ce qui concerne le gros œuvre, deux laboratoires nantais ont développé une technologie, BatiPrint3D, qui permet d'imprimer, sur place, des logements respectant les normes ⁽³⁾ en vigueur. Fin 2017 ⁽⁴⁾, l'emploi de cette technologie a permis de fabriquer, en quelques jours, un **logement social** de 95 mètres carrés à Nantes (*cf.* encadré).

Selon, M. Benoit Furet, enseignant-chercheur à l'université de Nantes et responsable du projet, cette technologie permet de réaliser des habitations ayant une performance énergétique présentant une consommation inférieure de 30 % à la réglementation thermique 2012 ⁽⁵⁾ (RT 2012). Néanmoins, seule l'observation, prévue pour une durée d'un an, des propriétés mécanique, acoustique et thermique de la maison imprimée à Nantes permettra de confirmer la viabilité de la technologie.

La technologie BatiPrint3D n'est pas la seule innovation mêlant fabrication additive et BTP. La jeune pousse française (*start-up*) XtreeE utilise l'impression 3D afin de réaliser des poteaux en béton de formes très complexes. Par exemple, XtreeE a participé à la construction d'un poteau de quatre mètres soutenant le préau d'une école d'Aix-en-Provence (illustration 7). Après avoir algorithmiquement optimisé la conception (*design*) d'un

(1) <http://www.lefigaro.fr/societes/2017/06/15/20005-20170615ARTFIG00289-michelin-ouvre-la-route-au-pneu-du-futur.php>

(2) <https://www.industrie-techno.com/la-sncf-sur-les-rails-de-la-fabrication-additive.50599>

(3) Contrairement à la technique de dépôt de mortier par impression 3D, cette technique permet de construire des bâtiments certifiés, les règles relatives à la construction du béton étant respectées (béton banché).

(4) <https://lejournel.cnrs.fr/videos/a-nantes-une-maison-construite-par-impression-3d>

(5) La RT 2012 a pour objectif de limiter la consommation d'énergie primaire des bâtiments neufs à un maximum de 50 kWhEP/(m².an).

architecte (illustration 8), XtreeE a imprimé en 3D ⁽¹⁾ l'enveloppe qui a servi de « coffrage perdu » au béton coulé par LafargeHolcim.

DESCRIPTION DE LA TECHNOLOGIE BATIPRINT3D

Un robot industriel articulé et monté sur un véhicule guidé par laser se déplace selon les spécifications définies dans la maquette numérique du logement (illustration 1). Il dépose, directement sur la dalle deux parois de mousse expansive, couche par couche, qui vont servir de coffrage (ill. 2) à du béton coulé par le robot (ill. 3). Le béton banché (*), une fois durci, va constituer le mur tandis que la mousse va jouer le rôle d'isolant.

La mousse expansive séchée présente des bosses (ill. 4), si bien que des travaux de finition sont nécessaires. Pour la finition extérieure (ill. 5), un écrêtage des bosses avant pose d'un induit est également nécessaire, tandis qu'une pose de plaque de plâtre (ill. 6) est réalisée pour la finition intérieure.

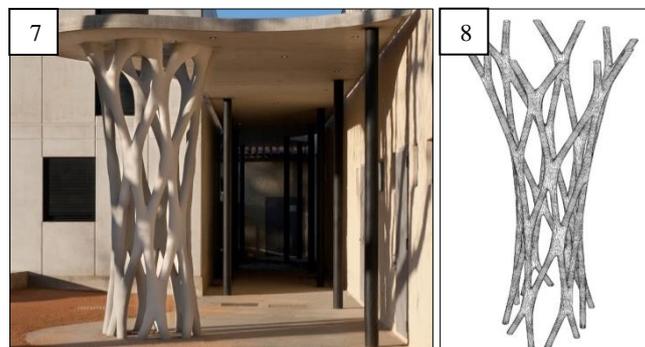


(*) : Selon le dictionnaire Larousse, une banche est un « coffrage ou panneau de coffrage utilisé pour la réalisation des murs en pisé ou en béton armé ».

Sources : Yhnova, université de Nantes.

Ainsi, ces deux exemples démontrent bien l'intérêt de l'utilisation de la fabrication additive pour la construction de bâtiments et la réalisation de travaux publics. **L'impression 3D est rapide, permet de réaliser des architectures complexes et aux normes (voire mieux), tout en rendant le travail moins pénible pour les ouvriers. Le développement des technologies de fabrication additive pour la construction pourrait ainsi participer à la modernisation de la filière BTP.**

ILLUSTRATIONS DES TRAVAUX DE XTREEE À AIX-EN-PROVENCE



Source : XtreeE.

(1) L'impression a duré 15 heures et 30 minutes.

B. EFFETS GLOBAUX SUR LES MODES DE PRODUCTION, ENJEUX ÉCONOMIQUES ET DE COMPÉTITIVITÉ INDUSTRIELLE

Selon M. Arnault Coulet, directeur de l'agence Fabulous, le marché de l'impression 3D (machines, matériaux et conseil) croît actuellement de 20 % par an et pourrait s'élever à 20 milliards d'euros à l'horizon 2020. Les États-Unis concentrent 30 % à 35 % du parc mondial des machines, la France ne représentant que 3 % à 4 %. Toujours selon M. Coulet, les entreprises françaises présentent des avantages compétitifs sur les matériaux (chimie), les services numériques (logiciels...) et les machines de haute qualité (notamment HSE)⁽¹⁾. Pour M. Didier Fonta, directeur commercial de l'entreprise Pollen AM, les entreprises françaises ont clairement intérêt à se positionner sur le segment des services d'impression 3D (conseil...).

L'analyse des exemples précédents montre que l'impression 3D correctement utilisée peut parfois se traduire par un fort avantage compétitif.

Tout d'abord, l'emploi de la fabrication additive peut donner lieu à d'importantes innovations. Produire des composants électroniques flexibles, imprimer des logements rapidement ou encore personnaliser (*customiser*) ses pneumatiques selon ses besoins sont des ruptures technologiques majeures qui donnent un avantage compétitif aux industries qui maîtrisent ces technologies.

Ainsi, selon l'Académie des technologies, l'impression 3D peut, dans une certaine mesure, remettre en cause certaines positions dominantes. Par exemple, rendre possible la personnalisation⁽²⁾ des produits par le client (chaussures, bouteilles de parfum, etc.) grâce à l'impression 3D est une valeur ajoutée considérable pour les acteurs historiques du marché du luxe. Néanmoins, cette possibilité peut aussi susciter l'arrivée de nouveaux acteurs en France.

L'impression 3D de faibles volumes de pièces spécifiques et particulièrement complexes peut permettre une montée en qualité et une réduction du coût de production, à l'image des buses du moteur LEAP dont la production par fabrication additive induit une importante valeur ajoutée pour le client et le fabricant.

Le passage à l'impression 3D simplifie grandement la gestion des stocks. La gestion des stocks en termes de coût, d'entreposage, et de traçage est un problème majeur pour les grands industriels comme Airbus. Ceux-ci doivent conserver des millions de pièces et les outillages adaptés pendant des décennies. L'impression 3D permet une production de pièces à la demande et un entreposage facilité (la matière première étant le plus souvent sous forme de poudres).

L'impression 3D permet aux entreprises maîtrisant ces technologies d'arriver sur le marché plus rapidement. La fabrication additive permet d'accélérer les phases de prototypage et de déceler rapidement les corrections à apporter sur le produit. Le produit est donc plus rapidement mis au point. En outre, l'investissement dans l'impression 3D par les PME et jeunes pousses (*start-up*) est abordable est relativement peu risqué⁽³⁾.

(1) Hygiène, sécurité, environnement.

(2) Selon le Service pour la science et la technologie de l'Ambassade de France aux États-Unis, des initiatives dans « la personnalisation de masse » sont perceptibles dans les secteurs de la fabrication de chaussures et, dans une moindre mesure, dans ceux de la bijouterie et de la décoration. En dehors de ces secteurs, l'essor de la personnalisation de masse reste incertain.

(3) Si l'on considère que l'impression 3D est plus flexible que l'usage d'un outillage spécifique. En revanche, certains procédés de fabrication additive ne sont pas encore matures et peuvent être considérés comme risqués.

L'impression 3D peut donc abaisser la barrière d'entrée à certains marchés. Il est à noter que l'impression 3D permet également de faire des précommercialisations (*soft launch*), permettant de tester le marché et de maîtriser les coûts de production (pas de frais d'outillage).

Enfin, l'usage de la fabrication additive peut favoriser la relocalisation de certaines activités au plus près du consommateur. Le concept de micro-usine intégrée dans l'aire urbaine pourrait voir le jour avec divers avantages : production à la demande, réduction des frais de distribution et effets environnementaux positifs.

III. ENJEUX DE SANTÉ

A. LA BIOIMPRESSION

Certains procédés de fabrication additive, dits de « bio-impression », permettent de produire artificiellement des structures cellulaires.

L'impression de gouttelettes de bio-encre sur support hydrogel ou sur plaque de culture a été le premier procédé de bio-impression mis au point. Aujourd'hui, on lui préfère le procédé de bio-impression laser, tel que développé au sein de l'UMR 1026⁽¹⁾, celui-ci permettant notamment une résolution d'impression des constituants des tissus (cellules, matrice extracellulaire) bien meilleure. Une autre méthode dite « par extrusion » est également utilisée.

En principe, les cellules imprimées peuvent provenir de cultures de cellules embryonnaires humaines. Néanmoins, de telles cellules sont, en pratique, difficilement disponibles, leur accès étant particulièrement encadré par la loi⁽²⁾ pour des raisons éthiques. Il est donc plus commode de produire et d'utiliser des cellules souches pluripotentes induites (CSPI) à des fins de bio-impression.

LES CELLULES SOUCHES PLURIPOTENTES INDUITES

Contrairement aux cellules souches adultes qui, après multiplication, ne peuvent produire que certains types de cellules différenciées, les cellules souches embryonnaires peuvent se multiplier à l'infini et se différencier en absolument n'importe quel type de cellules de l'organisme : elles sont dites pluripotentes.

De telles cellules présentent donc un intérêt particulier pour imprimer des tissus biologiques artificiels. Néanmoins, l'obtention de ces cellules suppose la destruction d'un embryon, d'où l'interdiction de leur utilisation en France (sauf dérogation accordée par l'Agence de la biomédecine).

Les techniques mises au point par Shinya Yamanaka, prix Nobel de médecine en 2012, permettent néanmoins de « reprogrammer génétiquement » pratiquement n'importe quelle cellule adulte prélevée, ce qui la rend pluripotente (comme une cellule souche embryonnaire) : on parle alors de cellules souches pluripotentes induites. Cependant, la phase de reprogrammation n'est pas toujours parfaite et peut être source d'instabilité génétique.

(1) <http://presse.inserm.fr/bio-impression-laser-du-vivant-une-approche-innovante-a-bordeaux/13009/>

(2) Loi n° 2013-715 du 6 août 2013 tendant à modifier la loi n° 2011-814 du 7 juillet 2011 relative à la bioéthique en autorisant sous certaines conditions la recherche sur l'embryon et les cellules souches embryonnaires.

À termes, l'impression de CSPI pourrait permettre de reconstituer :

- des organes artificiels pour remplacer des organes déficients, et ce, sans causer de rejet immunologique (les cellules employées étant celles du patient) ;
- des organes artificiels permettant, dans certains cas, d'effectuer des essais sans avoir recours à l'expérimentation animale ;
- des organoïdes 3D qui serviraient de modèles *in vitro* pour comprendre les interactions cellulaires, les dysfonctionnements pathologiques et tester de nouvelles approches thérapeutiques.

Si l'impression 3D d'organes complexes (reins, poumons, etc.) en vue de greffes reste expérimentale à ce stade⁽¹⁾, certaines applications thérapeutiques utilisant l'impression d'organes simples (cheveux, muqueuse gingivale et implants osseux) sont déjà très prometteuses.

À titre d'exemples : l'entreprise L'Oréal collabore ainsi avec Poietis (Pessac) pour traiter la calvitie en reconstituant un follicule pileux à l'aide de la technologie de bio-impression par laser ; l'UMR 1026 a développé un protocole de reconstruction de gencives pour greffe parodontale⁽²⁾ ; Labskin Creations (Lyon) s'est spécialisé dans la reconstitution de peaux artificielles ; Osseomatrix (Villebon-sur-Yvette) fabrique des implants osseux s'adaptant parfaitement à l'anatomie des pertes osseuses du patient. Deux sociétés américaines (Isco et Organovo) ont même réussi à produire un foie humain.

Ainsi, à court terme, la bio-impression pourrait profondément modifier la production d'implants simples (cheveu, gencive, peau, os) tandis que, sur le plus long terme, les progrès concernant l'impression d'organes complexes pourraient permettre de pallier la pénurie des donneurs. En outre, l'impression 3D d'organes fonctionnellement similaires aux organes humains pourrait limiter les besoins en expérimentation animale lors des recherches pharmacologiques.

IV. AUTRES APPLICATIONS DE L'IMPRESSION 3D DANS LE DOMAINE DE LA SANTÉ

Au-delà de la bio-impression, l'impression 3D peut être utile à de nombreuses autres applications médicales.

L'impression 3D a bouleversé la fabrication des prothèses auditives. Selon un rapport⁽³⁾ du Conseil économique social et environnemental (CESE) de 2015 : « *en l'espace de trois ans seulement, la part de l'impression 3D dans la production des prothèses auditives [...] est [...] passée de 0 % à 100 %.* ». L'impression 3D rend en effet possible la fabrication de prothèses auditives adaptées à l'audiogramme individuel et à l'anatomie du conduit auditif du patient.

(1) Du fait de l'absence de vaisseaux et de cellules inflammatoires d'origine sanguine, des difficultés de reconstruction des organes pluricellulaires et volumineux, etc.

(2) <https://www.mbcjournal.org/articles/mbcb/abs/2016/04/mbcb160063/mbcb160063.html>

(3) <http://www.lecese.fr/travaux-publies/innovations-technologiques-et-performance-industrielle-globale-exemple-impression-3D>

De manière analogue, l'impression 3D pourrait transformer le marché des prothèses dentaires en améliorant leur qualité tout en réduisant leur coût de fabrication. En effet, selon le dirigeant de la société Biotech Dental : il est possible de « *baisser les prix des prothèses [dentaires] de 40 % à 50 % et de [s'] aligner sur ceux de la Chine avec un atout, l'origine France garantie.* »⁽¹⁾.

L'impression 3D peut aussi trouver des applications dans la production de médicaments. Les techniques d'impression 3D peuvent être utilisées afin d'améliorer la galénique des médicaments, par exemple en permettant une libération complexe dans le temps du principe actif de ceux-ci. L'impression 3D peut aussi être envisagée pour la production, directement par le pharmacien, de médicaments personnalisés destinés à certains patients ayant des besoins très spécifiques.

LE ZIPDOSE, PREMIER MÉDICAMENT FABRIQUÉ PAR IMPRESSION 3D

Le médicament de la marque ZipDose est le premier médicament imprimé en 3D ayant reçu une autorisation de mise sur le marché aux États-Unis.



Le ZipDose (à gauche) est quasiment dissous au bout de 2 secondes, et ce, dans un faible volume d'eau.

Commercialisé depuis 2016, ce médicament peut être prescrit aux personnes épileptiques afin de calmer leurs crises. D'un point de vue chimique, le ZipDose n'est pas très différent des médicaments concurrents. Du fait de son impression en 3D, il possède cependant l'avantage de se dissoudre en quelques secondes et dans une simple gorgée d'eau. Cela est particulièrement appréciable pour les personnes épileptiques, qui souffrent de problèmes pour déglutir lors de leurs crises.

Enfin, l'impression 3D peut être utilisée en chirurgie. La fabrication additive permet, tout d'abord, de simuler des opérations chirurgicales avant de les effectuer réellement. Par exemple, une intervention réalisée au CHU d'Amiens à l'automne 2017 a permis de redresser un rachis. Après scanner, le squelette d'un patient a été reconstitué à l'identique en 3D, permettant la modélisation d'une intervention chirurgicale par un robot sur ce squelette en plastique. Une fois l'opération validée sur la maquette, elle a été réalisée sur le patient. **En outre, l'usage de l'impression 3D pourrait permettre d'améliorer la formation des étudiants en chirurgie.** Ceux-ci pourraient s'entraîner régulièrement à réaliser des gestes thérapeutiques (implantation de prothèses, interventions chirurgicales...) dans des situations proches de la réalité. Ainsi, selon le professeur Guy Vallancien, la durée de formation des chirurgiens pourrait, à terme, être réduite d'environ deux ans grâce à l'usage des outils de simulation tels que l'impression 3D.

(1) <http://www.lefigaro.fr/entrepreneur/2017/04/19/09007-20170419ARTFIG00077-avec-upperside-philippe-veran-cultive-les-nouvelles-technologies.php>

V. USAGE DE L'IMPRESSION 3D PAR DES PARTICULIERS

La possibilité de produire soi-même ses objets, et ce, à domicile, a provoqué un fort engouement médiatique au début de cette décennie. **Dans les faits, le marché domestique de l'impression 3D est néanmoins resté très peu dynamique.**

Tout d'abord, moins de 1 % de la population européenne possède une imprimante 3D ⁽¹⁾. Il existe, certes, des imprimantes de prix très abordables, mais l'intérêt des particuliers pour ces machines diminue rapidement à l'usage. En effet, réaliser ses propres projets avec une imprimante personnelle est lent et parfois décevant ⁽²⁾. De plus, la conception ou la modification de pièces est complexe, les logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) étant difficiles à maîtriser.

En outre, les « fab-labs » français ⁽³⁾ sont de plus en plus orientés vers des utilisations professionnelles et sont délaissés par les particuliers ⁽⁴⁾ ; rares sont les personnes utilisant à titre personnel des services d'impression 3D (par exemple, seuls 5 % des clients du service d'impression 3D de l'entreprise TopOffice sont des particuliers) ⁽⁵⁾.

Néanmoins, à moyen terme, une partie plus importante de la population pourrait utiliser l'impression 3D de manière occasionnelle. La reconversion ou la diversification de certaines boutiques de reprographie voire de quelques bureaux de La Poste ⁽⁶⁾ pourraient contribuer à mieux faire connaître l'impression 3D au grand public. En outre, certains éditeurs de logiciels de CAO tendent à simplifier l'utilisation de leurs produits tandis que des applications de nos terminaux de poche (*smartphones*) permettent déjà de scanner des objets afin de générer des modèles 3D imprimables.

Il convient donc d'anticiper les conséquences de l'usage des techniques d'impression 3D par les particuliers, notamment des points de vue juridiques, de la sécurité des personnes et de leur santé.

A. LES QUESTIONS JURIDIQUES POSÉES PAR L'USAGE DE L'IMPRESSION 3D PAR LES PARTICULIERS

Si l'usage de la fabrication additive venait à se répandre dans les foyers français, d'importantes questions de propriété intellectuelle pourraient se poser.

Tout d'abord, selon le CESE, il existe une incertitude quant à la manière de protéger les « véritables créations numériques originales destinées à une impression 3D », aussi bien en tant qu'« œuvres de l'esprit » (droit d'auteur) qu'au titre de la propriété industrielle.

En outre, l'utilisation massive de l'impression 3D par des particuliers et pour leurs propres usages ⁽⁷⁾, pourrait représenter un danger pour les entreprises de certains secteurs, par

(1) <https://osha.europa.eu/en/tools-and-publications/publications/3d-printing-new-industrial-revolution/view>

(2) *La qualité est souvent basse avec des imprimantes personnelles et les modèles 3D trouvés sur internet ne correspondent pas toujours exactement aux besoins des propriétaires d'imprimantes.*

(3) *En ce qui concerne l'Allemagne, selon la contribution de l'Ambassade de France à Berlin, « la notoriété des fab-labs est en hausse régulière ».*

(4) *Même source que la note de bas de page précédente.*

(5) <https://www.usine-digitale.fr/article/impression-3d-baisse-d-interet-du-grand-public.N375797>

(6) <https://legroupe.laposte.fr/innovation/l-impression-3d-avec-la-poste>

(7) *Donc, hors de toute relation commerciale et, donc, hors du cadre juridique de la contrefaçon.*

exemple celles de l'industrie du jouet. Ces entreprises pourraient être découragées d'investir en R&D et en conception de nouveaux produits.

Enfin, si le partage illégal ou la « copie privée », autorisée dans le cadre familial, de modèles 3D devenaient communs, nuisant ainsi aux ayants-droit, des solutions juridiques devraient rapidement être trouvées. De manière analogue à ce que l'on a vécu pour les fichiers culturels (musiques, films, etc.), plusieurs approches pourraient être envisagées : la mise en jeu de la responsabilité des utilisateurs finaux (qui pourrait s'inspirer de la Haute Autorité pour la diffusion des œuvres et la protection des droits sur internet – Hadopi, dont le bilan est toutefois discuté) et des plates-formes d'intermédiation, la promotion d'une offre légale, la sécurisation des fichiers par DRM (*digital right management*), la « taxation » des matériaux en contrepartie de la copie privée à l'instar des supports numériques vierges, etc.

B. LES INTERROGATIONS LIÉES À LA QUALITÉ DES PIÈCES PRODUITES PAR DES PARTICULIERS

Les pièces imprimées par les particuliers sont fabriquées en dehors de tout circuit de contrôle. Cela pose un problème de sécurité physique des personnes, la fiabilité des pièces imprimées et le respect des normes n'étant pas garantis. Par exemple, une pièce de rechange imprimée pour une automobile pourrait ne pas répondre aux propriétés mécaniques ou chimiques nécessaires et être à l'origine d'un accident. L'impression 3D peut aussi nuire à la sécurité alimentaire. Des études ont montré que la vaisselle fabriquée en 3D à partir de filaments ABS et PLA ⁽¹⁾ pouvait contenir des résidus chimiques dangereux ainsi que des microfissures propices au développement rapide de bactéries. Ainsi, l'ABS ne répond pas aux normes sur les matériaux relatives au contact alimentaire ou au contact avec la peau.

Se pose ainsi la question de la responsabilité en cas d'accident dû à une pièce défaillante imprimée en 3D. Le responsable de l'accident est-il le fabricant de l'imprimante, celui du matériau, le concepteur du fichier numérique ou la personne qui a imprimé la pièce ?

C. LES INTERROGATIONS LIÉES À LA SANTÉ

Des études menées par l'Institut de technologie de l'Illinois et par l'école d'ingénieurs INSA Lyon, ont montré que, lorsqu'elles fonctionnent, **les imprimantes 3D de bureau** ⁽²⁾, tout comme celles installées en milieu professionnel, **émettent de nombreuses particules ultrafines (moins de 100 nanomètres), de même que des composants volatiles organiques (COV) dangereux.** Ainsi, l'usage de ces imprimantes pourrait présenter un risque pour la santé, en particulier dans les lieux insuffisamment ventilés. Le marché des imprimantes 3D grand public ne doit pas rester à l'écart d'une offre « premium », voire d'une normalisation HSE ⁽³⁾.

(1) L'acide polylactique (polylactic acid – PLA) est un polymère très utilisé en impression 3D.

(2) Le plus souvent, les imprimantes 3D de « bureau » fonctionnent par dépôt de filament. C'est au moment de la fusion de ces filaments que des particules peuvent être émises.

(3) Hygiène, sécurité, environnement.

VI. PERSPECTIVES ET PRÉCONISATIONS

Nombre de technologies présentées dans cette note sont encore perfectibles ou toujours à l'état préindustriel. Elles démontrent néanmoins la valeur ajoutée et le potentiel de l'impression 3D dans certains cas.

L'impression 3D ne semble, à ce stade, n'être qu'à ses débuts. **D'importantes recherches** (dont les principaux modes de financement en France sont expliqués en annexe n° 1) **sont menées pour améliorer les techniques existantes, les rendements, la solidité** ⁽¹⁾ **des pièces, ou élargir le champ d'application de la fabrication additive.** Citons, par exemple :

– **l'impression 4D**, un domaine expérimental qui consiste à imprimer en 3D des matériaux « stimulables », qui changent de propriétés (couleur, forme, etc.) dans le temps en fonction des conditions (température, humidité, etc.) ;

– **la nano-impression 3D** de composants, qui fait l'objet de recherches à l'Université de Lorraine et qui intéresse les secteurs de l'électronique et de l'horlogerie ;

– **les recherches menées sur les scanners 3D** au sein de l'institut Carnot Cetim, qui permettent de scanner des pièces de plus en plus grandes (dizaines voire centaines de mètres) puis de générer des modèles 3D de plus en plus précis.

Ainsi, certains rapports estiment que, sur le très long terme, jusqu'à 50 % des produits manufacturés seront fabriqués grâce aux imprimantes 3D ⁽²⁾.

En prévision des avantages économiques, écologiques ou de santé publique que pourrait induire la fabrication additive (voir l'annexe n° 3), quelques préconisations pourraient être faites afin de favoriser au mieux le développement de l'impression 3D en France :

– **encourager la recherche pluridisciplinaire portant à la fois sur les matériaux, les procédés et les algorithmes.** Selon le directeur général délégué à la science de l'INRIA, les algorithmes de simulation et de modélisation des procédés et des matériaux utilisés en fabrication additive ne sont pas satisfaisants. Les possibilités offertes par les recherches portant sur les matériaux et les procédés sont donc sous-exploitées du fait du manque de recherche en algorithmique ;

– **soutenir la recherche et les investissements** de cette technologie de rupture que constitue l'impression 3D, notamment par les subventions du programme d'investissement d'avenir (PIA) et de la Banque publique d'investissements (BPI), ainsi que les appels à projets de l'Agence nationale de la recherche (ANR) et du programme européen Horizon 2020 (annexe n° 1) ;

– **renforcer la structuration de la filière en soutenant l'action de l'Alliance industrie du futur (AIF) et l'institut Carnot Cetim** (annexe n° 2), notamment par une mise en réseau des acteurs (centres de recherche, universités, centres de formation, entreprises...). Il convient de décliner territorialement cet effort en invitant les régions à participer, autour des

(1) Voir le test de l'entreprise Scupteo consistant à parcourir 1 000 kilomètres entre Las Vegas et San Francisco avec un vélo imprimé en 3D.

(2) D'après l'Ambassade de France aux Pays-Bas, un rapport de mars 2017 de la société ABN AMRO prévoit que 50% des produits manufacturés seront fabriqués en 3D en 2060.

pôles de compétitivité et des plates-formes de référence (Île-de-France à Saclay, Pays-de-la-Loire, Grand-Est, Auvergne-Rhône Alpes et Occitanie). Il s'agit d'accompagner les entreprises dans leur transformation et dans la maîtrise de ces nouvelles solutions ;

– **inclure l'apprentissage des techniques de fabrication additive dans la formation de tous les professionnels potentiellement amenés à utiliser ces techniques (prothésistes, fondeurs, etc.) ;**

– **encourager le développement d'outils logiciels adaptés aux professionnels utilisant la fabrication additive et aux particuliers**, de manière à ce que l'impression 3D ne soit pas réservée aux experts de la CAO ;

– **évaluer la dangerosité pour la santé de l'usage des imprimantes 3D** (imprimantes « premium », normes HSE) **et communiquer sur les bonnes pratiques d'utilisation des machines de bureau** (utilisation dans un espace ventilé, port d'équipements de protection individuel comme des masques à filtration, etc.) ;

– **accompagner financièrement les sociétés françaises de bio-impression afin qu'elles puissent aller jusqu'aux phases III ⁽¹⁾ de leurs études cliniques, leur permettant ainsi de devenir potentiellement de grands groupes pharmaceutiques spécialisés dans ce secteur ;**

– **soutenir l'avancement des travaux de l'Association française de normalisation (AFNOR), qui « pilote actuellement les travaux de normalisation européens sur le thème de la fabrication additive » ⁽²⁾ ;**

– **identifier précisément les problèmes de propriété intellectuelle soulevés par les technologies de fabrication additive** (en termes de licences, de méthodes de paiement, de conception, de collaboration, etc.).

(1) La phase III des essais cliniques consiste à comparer les effets du traitement qui fait l'objet des essais avec un traitement standard. Cette phase est extrêmement coûteuse et chronophage, les essais portant sur plusieurs centaines voire milliers de malades et durant au moins quatre ans. Une fois validée, cette phase donne accès à la possibilité d'effectuer une demande d'autorisation de mise sur le marché du traitement.

(2) <https://normalisation.afnor.org/actualites/fabrication-additive-la-france-au-coeur-des-premiers-travaux-europeens/>

ANNEXES

ANNEXE N° 1 : QUELLE RECHERCHE EN IMPRESSION 3D EN FRANCE ?

En France, la fabrication additive est identifiée dans la stratégie nationale de recherche (SNR) France-Europe 2015-2020 comme un des outils du « nouveau industriel » (défi 3) dans le domaine de la « conception de nouveaux matériaux » (orientation 14). Les plans d'investissement successifs consacrent cependant pas ou peu de moyens directs à la fabrication additive.

L'impression 3D est brièvement mentionnée ⁽¹⁾ dans le rapport relatif à la mise en œuvre et au suivi des investissements d'avenir annexé au projet de loi de finances (PLF) 2017: « *En 2015-2016, [...] un [appel à manifestation d'intérêt] [...] a permis de sélectionner 12 initiatives [portant sur les domaines "big data"], objets intelligents, prototypage et impression 3D* ». Cette mention disparaît dans le rapport annexé au PLF 2018 et n'apparaît pas non plus dans l'annexe au PLF 2018 relative au Grand plan d'investissement.

Néanmoins, les programmes d'investissement d'avenir (PIA) financent la recherche sur l'impression 3D de manière indirecte. Par exemple, 4 instituts de recherches technologiques (IRT) ⁽²⁾ – des structures partenariales de recherche public-privé en partie financées par les PIA – développent des recherches dans le domaine de la fabrication additive. De plus, 11 instituts Carnot – d'autres structures de valorisation de la recherche financées par le PIA – sont, eux aussi, positionnés sur cette filière.

En outre, dans une certaine mesure, des projets de recherche relatifs à la fabrication additive sont financés par des appels à projets. Au 21 février 2018, l'Agence nationale de recherche (ANR) a financé 27 projets ⁽³⁾ relatifs à l'impression 3D. Les subventions sont toutefois assez modestes.

DEUX DERNIERS PROJETS D'IMPRESSON 3D FINANCÉS PAR L'AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE (ANR)

(euros)

Nom du projet	Thématique	Montant de la subvention
Projet SLOW2	Recherche fondamentale sur un nouveau procédé de « stéréo-nano-lithographie ».	475 034
Projet VIDA	Prédiction de l'apparence des matériaux.	264 600

Source : ANR.

À l'échelle européenne, le 7^e programme-cadre (PCRD) géré par la Commission européenne a consacré 160 millions d'euros entre 2007 et 2013 à des projets de fabrication additive. Le programme Horizon 2020 (H2020), qui en prend la suite, continue de financer de tels projets.

(1) Voir la mission « économie », action « soutien aux usages, services et contenus numériques innovants », volet « subventions et avances remboursables » du rapport.

(2) Les IRT concernés sont « Saint Exupéry » à Toulouse, « Jules Verne » à Nantes, « SystemX » à Paris et « M2P » à Metz.

(3) À titre de comparaison, 97 projets du domaine de « l'internet des objets » ont été financés par l'ANR au 21 février 2018.

Au total, l'institut Carnot Cetim a récemment identifié 60 centres de compétences (IRT, instituts Carnot, laboratoires, etc.) d'impression 3D en France ⁽¹⁾, ceux-ci se partageant « 57 millions d'euros de matériel dédiés et un budget annuel de 51 millions d'euros », dont 40 % proviennent de partenariats industriels directs. Ils représentent 524 ETP (équivalent temps-plein) directs. Une partie significative de la recherche dans ce domaine est donc le fruit de partenariats public-privé. Par exemple, la récente initiative Additive Factory Hub, mutualise les expertises publiques (Université Paris-Saclay, Cetim, CEA, etc.) et privées (Air Liquide, PSA, Safran, Prodways, etc.) de la région Île-de-France afin de développer des nouveaux outils et procédés d'impression 3D.

Malheureusement, la recherche française n'est, pour le moment, pas très bien positionnée en ce qui concerne la production de brevets relatifs à l'impression 3D. Selon l'institut Fraunhofer pour les systèmes et la recherche innovante (*Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung*), les 32 premiers déposants de brevets dans le domaine de la fabrication additive (2003-2012) sont les suivants :

Pays (*)	Déposant	Part des brevets (%)
Allemagne	EOS Electro Optical Systems	3,4
États-Unis	3D Systems	3,2
États-Unis	Evonik Degussa	2,7
Allemagne	MTU Aero engines	2,5
États-Unis	HP Development Company	2,4
Allemagne	Siemens	2,1
Pays-Bas	TNO	1,9
États-Unis	Stratasys	1,7
Allemagne	Fraunhofer	1,4
Allemagne	Voxeljet AG	1,4
Israël	Objet Geometries	1,2
Pays-Bas	DSM IP Assets	1,1
États-Unis	The Boeing Company	1,1
États-Unis	General Electric Company	1,0
Suède	ARCAM	0,9
États-Unis	Nike international	0,9
Grande-Bretagne	BAE Systems	0,8
Japon	Panasonic Electric Works Company	0,8
Italie	DWS	0,8
États-Unis	E.I. du Pont de Nemours & Company	0,7
États-Unis	Eastman Kodak Company	0,7
Suisse	Michelin Recherche et technique	0,7
Japon	Mimaki Engineering Company	0,7
États-Unis	Z Corporation	0,7
Allemagne	EADS Allemagne	0,6
Japon	Fujifilm Corporation	0,6

(1) <http://www.cetim.fr/fr/Mecatheque/Resultats-d-actions-collectives/Cartographie-des-acteurs-cles-de-la-R-D-en-fabrication-additive>

Allemagne	BEGO Medical	0,6
Allemagne	EnvisionTEC	0,6
Liechtenstein	Ivoclar Vivadent	0,6
États-Unis	Pratt & Whitney Rocketdyne	0,6
France	SNECMA	0,6
États-Unis	United Technologies Corporation	0,6
Total		39,6

(*) : « Pays » désigne le lieu où la recherche est effectuée. Par exemple Michelin est une entreprise française, néanmoins c'est sa filiale « Michelin Recherche et technique », qui effectue des recherches sur l'impression 3D.

ANNEXE N° 2 : LA STRUCTURATION DE LA FILIÈRE EN FRANCE

Le fait que l'impression 3D trouve des applications dans un nombre important de domaines transverses semble empêcher la constitution d'une filière autonome, distincte des grandes filières sectorielles actuelles. Néanmoins, les acteurs du secteur ont vite identifié la nécessité de s'organiser pour pallier le relatif retard de la France sur la scène européenne et mondiale. **L'institut Carnot Cetim** s'est positionné sur la fabrication additive et a participé à l'implantation d'un tissu industriel territorialisé, aux côtés des grands donneurs d'ordres (Vinci, Bouygues, Valeo, PSA, Michelin, Thales, Airbus, Safran, Faurecia) et de leurs sous-traitants, majoritairement des PME ou des jeunes pousses ⁽¹⁾.

Créé en 1965, le Cetim (Centre technique des industries mécaniques) est l'un des 11 CTI (centres techniques industriels) ⁽²⁾. Il est labellisé « institut Carnot » depuis 2010 et est membre fondateur de l'Alliance industrie du futur (AIF). L'AIF, une initiative lancée en 2015 et dont le premier comité de pilotage a été présidé par Emmanuel Macron, alors ministre de l'économie, de l'innovation et du numérique, est une association regroupant au niveau national les acteurs importants dans le domaine de l'innovation technologique : organisations professionnelles (syndicats et fédérations industrielles), partenaires technologiques (CEA, Cetim...) et partenaires académiques (grandes écoles d'ingénieurs principalement). L'AIF s'organise en sept groupes de travail partagés selon trois axes d'action (développer, accompagner, diffuser) ⁽³⁾.

Si elle n'est pas centrée uniquement sur l'impression 3D, l'AIF tend à se positionner en tant qu'acteur institutionnel majeur, afin de structurer l'écosystème français. Elle a élaboré la feuille de route de la fabrication additive en 2016, en associant une centaine d'acteurs industriels, de la recherche ou académique ⁽⁴⁾. Cette feuille de route propose une mutualisation progressive des moyens (financements, veille technologique, diffusion référentiels) et une coordination des acteurs (mise en réseau, partenariats avec les régions).

La filière semble s'organiser de façon réticulaire. Une structuration territorialisée se dessine, avec l'AIF et le réseau du Cetim comme interlocuteurs nationaux, autour de pôles de compétitivités et de plates-formes de recherche implantées en régions, pour mieux coordonner les recherches et organiser des « réseaux de complémentarité ».

(1) https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/etudes-et-statistiques/prospective/Industrie/2017-Fabrication-additive.pdf

(2) <https://www.entreprises.gouv.fr/secteurs-professionnels/liste-des-centres-techniques-industriels-cti>

(3) http://docs.wixstatic.com/ugd/7f22a7_09e79446617c4295863859296c2142e2.pdf

(4) http://aif.diwi.org/wp-content/uploads/2016/10/2016-11-25-Pr%C3%A9sentation-1-Feuille-de-Route-FA_AIF.pdf

ANNEXE N° 3 :
RETOURS ATTENDUS DE L'IMPRESSION 3D AU ROYAUME-UNI
ET AUX ÉTATS-UNIS

– Royaume-Uni

Un rapport du gouvernement britannique ⁽¹⁾ de 2017 estime que la fabrication additive sera, dans les dix prochaines années :

– **Un important levier économique**, les prévisions estimant à 72 milliards de livre sterling (81,2 milliards d'euros) le retour de l'usage de la fabrication additive sur l'économie britannique ;

– **Un facteur d'amélioration du pouvoir d'achat** des britanniques, du fait de la répercussion d'une partie de la baisse des coûts de production, estimée à 4,4 milliards de livre sterling (5 milliards d'euros), selon les estimations de prix ;

– **Un outil de réduction de l'émission de CO₂**. L'impression 3D doit permettre de réduire le recours au transport de marchandises et ainsi diminuer le rejet de dioxyde de carbone de 12,6 millions de tonnes en Grande-Bretagne en 2027 par rapport à 2017 ;

– **Un instrument d'amélioration des conditions de travail**, devant réduire de 7 % le nombre d'accidents du travail non mortels des métiers liés à la fabrication (en Grande-Bretagne).

– États-Unis

En ce qui concerne les États-Unis, la fabrication additive pourrait constituer, dans les dix prochaines années :

– **Un important levier économique**, un rapport récent ⁽²⁾ du cabinet d'études A.T. Kearney estimant à 900 milliards de dollars américains (soit environ 800 milliards d'euros) le retour de l'usage de la fabrication additive sur l'économie américaine ;

– **Une source de création d'emploi**. Selon le même rapport d'A.T. Kearney, l'utilisation de la fabrication additive dans l'industrie pourrait créer de 3 à 5 millions d'emplois qualifiés aux États-Unis.

– **Un outil de réduction de l'empreinte carbone**. Selon le ministère de l'énergie (*Department of Energy*) en place sous l'administration du président Obama, les technologies additives permettraient d'économiser 50 % d'énergie par rapport aux procédés manufacturiers « soustractifs ».

(1) <https://www.gov.uk/government/publications/made-smarter-review>

(2) <https://www.atkearney.com/documents/20152/888957/3D+Printing+and+the+Future+of+the+US+Economy.pdf/7719fc50-50b9-6194-4c4c-c3de38e9a88c>

ANNEXE N° 4 :
CONTRIBUTION DE L'ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES

Paris le 31 janvier 2018

Monsieur le Premier Vice-président, *sur Cedric,*

En réponse à la demande de l'OPECST sur l'impression 3D, j'ai l'honneur de vous transmettre les réponses de l'Académie des technologies aux questions que l'Office a posé sur ce sujet. Ces réponses s'appuient notamment sur des interviews d'industriels dans différents secteurs économiques (dont Eric Carreel de Sculpteo, Thierry Thomas de Safran Additive Manufacturing), menées pour décrire la réalité industrielle de cette technologie.

Je suis à votre disposition pour vous apporter tout éclairage complémentaire.

Pour le Président de l'Académie des technologies



Yves BAMBERGER
Président du Comité des travaux

LES PRINCIPAUX MESSAGES DU DOCUMENT

1. La fabrication additive (FA) provoquera des bouleversements dans de nombreux domaines : source d'opportunités et de relances de secteurs, elle est naturellement aussi source de risques pour les acteurs dominants notamment (par exemple le secteur du luxe en France). Il est donc essentiel d'être vigilant et ambitieux.
2. L'industrie est concernée, mais il ne faut pas oublier le grand public même si pour l'instant son engouement pour la FA ne semble pas au rendez-vous.
3. Dans tout domaine, la clé du succès tient à la capacité d'intégration matériaux / robotique / machine de fabrication / logiciels mais aussi au talent d'utilisation, ce qui nécessite de susciter coopération et mise en réseau des acteurs concernés (voir point 5).
4. Impactant de nombreux domaines, la FA pourrait permettre de revenir dans la filière de la machine – outil.
5. Au-delà des initiatives déjà prises, pour réussir, il faut, à l'instar d'autres pays, une action des pouvoirs publics pour soutenir et renforcer la mise en réseau, la coordination, la coopération entre les acteurs mobilisés autour de la FA, de l'université et de la recherche vers les start-ups et industriels existants ; un ou quelques nœuds de réseau pourraient être chargés explicitement de la coordination et de promouvoir les coopérations avec des objectifs précis (le CETIM et les Instituts Carnot ?).
6. La FA peut être un des leviers de relocalisations industrielles et d'aménagement du territoire compte-tenu des opportunités qu'elle permet.
7. Dans le cadre des réformes de l'enseignement, il serait judicieux d'utiliser la FA dans l'enseignement général et professionnel pour travailler la matière, sensibiliser au réel, préparer les acteurs de demain.
8. Enfin il est nécessaire de penser au droit de propriété.

Remarques préliminaires

Il existe une organisation nationale et même internationale de la fabrication 3D. Cette fabrication 3D est définie par la norme NF-ISO/ASTM 52900 comme « procédé consistant à assembler des matériaux pour fabriquer des pièces à partir de données de modèle en 3D, en général couche après couche, à l'inverse des méthodes de fabrication soustractive et de mise en forme ». Cette technologie disruptive par rapport à la fabrication traditionnelle, et qui a en fait démarré il y a 15-20 ans voit ses applications démultipliées dans le cadre de la « transition numérique » et de la 4^e révolution industrielle (« industrie du futur » ou « usine 4.0 », chère à l'Allemagne).

Vous pouvez contacter le responsable de ce sujet pour la France : tahar.melliti@laposte.net (plutôt « politique ») ou jean.sreng@cea.fr (plus « technique ») ainsi que visiter le site dédié de l'Alliance pour l'Industrie du Futur (AIF) : <http://aif.diwi.org/>. Par ailleurs, presque toutes les régions de France et presque tous les organismes tels que le CEA, le CNRS, la FIM/CETIM, Syndicat du conseil, l'UIMM etc... ont un groupe de travail sur la fabrication additive. Citons l'étude de recensement des acteurs clés de la R&D en fabrication additive (compétences et moyens) en France qui a été réalisée auprès de 60 centres de compétences (mai 2017). Cette cartographie a été établie par les Instituts Carnot (denis.roizard@iceel.fr) de la filière Manufacturing, dont le CETIM est pilote, en lien avec l'AIF et la communauté Fabrication additive : <http://www.cetim.fr/Actualites/En-France/A-la-une/La-fabrication-additive-a-sa-cartographie-des-acteurs-clés-de-la-R-D> (également téléchargeable sur le site dédié de l'AIF).

La DGE et le CGET¹ ont publié une étude prospective sur le futur de la fabrication additive (janvier 2017)

https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/etudes-et-statistiques/prospective/Industrie/2017-Fabrication-additive.pdf. Cette étude analyse le positionnement et les conditions de développement de la fabrication additive en France et dans ses territoires, sur le marché grand public et au sein des filières industrielles et de leurs processus productifs. Elle présente aussi une analyse SWOT² de l'offre française dans un contexte international.

Nous sommes donc face à un sujet en pleine effervescence.

1. Pourquoi ce sujet ? Vers quelles directions orienter notre étude ?

Ce sujet est effectivement très important à étudier pour l'OPECST compte-tenu des implications techniques, stratégiques, industrielles, économiques et sociétales. Cet aspect varié des impacts potentiels de ce développement technologique est particulièrement développé ici autour de la question 4.

- a. La technologie est encore en développement avec de nombreuses voies techniques possibles suivant le type d'application, le type de matériau concerné, l'arbitrage qualité/ productivité / coûts, etc...
- b. Nous sommes typiquement encore dans la période classique d'excitation autour d'une nouvelle technologie où les investissements publics et privés augmentent rapidement. Cet enthousiasme sera forcément partiellement « douché » pour certaines pistes avant que les vraies pistes d'industrialisation ne soient dégagées – même si certaines

¹ En collaboration avec l'Observatoire de la plasturgie, le Syndicat français de l'industrie cimentière, Aluminium France, l'Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux ainsi que la Fédération forge fonderie

² Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats

existent déjà comme celle des prothèses ou de certains composants dans l'aviation. Avoir misé sur les bonnes technologies, les bons sujets ainsi que sur les bonnes conditions d'application fera la différence.

- c. La France n'a pas de véritable politique aujourd'hui dans le domaine mais commence à en développer une (voir remarque ci-dessus sur l'AIF et le rapport DGE/CGET, avec la difficulté des relations nationales / régionales). L'Académie des technologies a d'ailleurs publié récemment un rapport sur l'industrie du futur qui inclut la fabrication additive³. Ce rapport souligne la nécessaire coordination nationale et régionale. Il est à noter que l'Allemagne, les USA et le Japon ont lancé chacun une initiative nationale.
- d. Le PIA3 met une forte priorité sur la « transition numérique », laquelle inclut la fabrication additive. C'est pourquoi, plusieurs instituts créés par le PIA1 se sont fédérés pour attaquer ce sujet. C'est particulièrement le cas de 4 Instituts de Recherche Technologiques (IRT) sur les 8 existants.
- e. Des bouleversements sont à attendre avec leur cortège d'opportunités et de risques pour nombre de secteurs industriels, Des positions dominantes pourront être gagnées, d'autres perdues. C'est ainsi par exemple, que l'industrie du luxe, où la France est dominante, doit être active ! De plus, les progrès de la fabrication additive vont rendre obsolètes certains types de fabrication actuels dans des secteurs déjà en situation difficile : par exemple, la plasturgie, la forge, la fonderie. Une évolution importante de ces métiers est à prévoir. Ils en sont conscients : c'est une opportunité aussi mais ce ne sera pas indolore.

³ Industrie du futur : du système technique 4.0 au système social, rapport voté le 8 novembre 2017

Le rapport de l'Académie des technologies insiste sur la formation pour réussir la transition numérique.

Quant à savoir dans quelle direction orienter l'étude de l'OPECST, nous ne pouvons pas facilement donner de priorités tant les différents aspects sont entremêlés même si une analyse fine de la situation de secteurs-clés (aéronautique, automobile, secteur médical, industrie du luxe particulièrement) semble une base.

2. Quels sont les champs d'application de l'impression 3D ? Outre les aspects industriels, quelle est l'importance de l'usage domestique (ou dans les « Fab lab ») de l'impression 3D ? Comment prévoyez-vous l'évolution du marché « grand public » de l'impression 3D ?

Les imprimantes sont et seront de dimensions très différentes. Des petits ateliers et des bricoleurs se procureront des petites machines simples ou très spécialisées et des grands industriels dans divers secteurs s'équiperont d'un parc de grandes machines, avec tous les intermédiaires imaginables.

Les aspects « grand public » concernent les imprimantes 3D permettant de fabriquer des formes complexes avec une précision qui ira croissante. Ces imprimantes sont déjà disponibles sur le marché avec les logiciels associés (il suffit de taper « imprimante 3D » sur un moteur de recherche). L'ensemble est accessible à des prix raisonnables (500€ environ). Le matériau est un plastique spécial. Il n'est pas facile de savoir qui va prendre la place prépondérante dans la chaîne de valeur entre les fabricants de machine, les fournisseurs de matériaux et les fournisseurs de logiciels.

L'accessibilité de cette technologie à un environnement familial va permettre une très grande diversité d'utilisations pour l'instant peu prévisibles.

Les utilisateurs potentiels familiaux ne semblent cependant pas pour le moment se ruier pour utiliser ces nouvelles possibilités⁴.

Un autre aspect important est la précision de la forme obtenue. La compétition se fera sur les aspects prix et sur les aspects qualité, avec probablement une vaste gamme d'imprimantes entre « approximatif mais pas cher » et « plutôt précis mais plus cher ». La France a sûrement des atouts sur les matériaux et sur les logiciels. Elle a moins d'atouts sur la fabrication des machines elle-même sauf pour des créneaux industriels assez spécialisés⁵. Nous sommes pratiquement absents des imprimantes « familiales » car les grands acteurs du marché pour les imprimantes 2D en développent déjà.

Les « Fab lab » sont un élément indispensable pour que la technologie soit accessible à un grand nombre d'entreprises. C'est important pour leur montée en compétence : il faut pouvoir expérimenter sur des machines concrètes sur des « produits » qui vous concernent (voir **encart 1**). Ces « Fab lab » sont également importants pour la formation initiale et continue (voir aussi 4.3.4 en complément).

Notons au passage que les premières imprimantes 3D ont commencé en France grâce à Jean-Claude André⁶.

⁴ Au Consumer Electronic Show qui s'est tenu à Las Vegas début janvier 2018, l'absence de leaders du domaine témoigne des difficultés actuelles du marché de l'impression 3D « grand public »

⁵ Par exemple l'entreprise BeAM : <http://www.beam-machines.fr/> pour le rechargement laser

⁶ 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

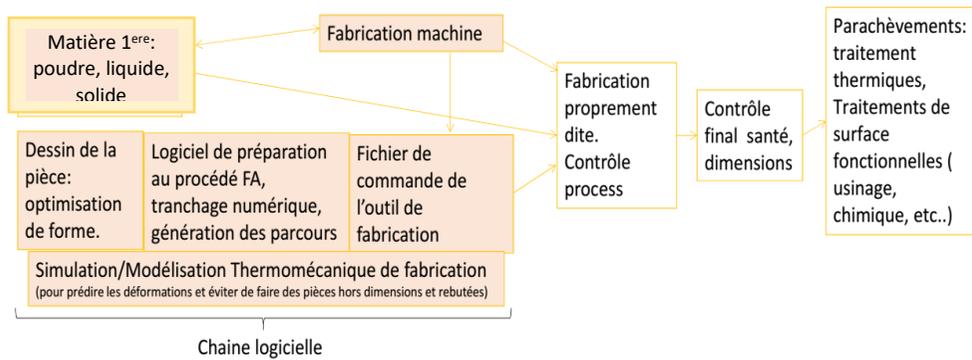
Encart 1 - Un exemple de Fab Lab créé dans une ETI dont tous les services tirent profit de l'impression 3D plastique : du prototype au bureau d'étude, des démonstrateurs marketing à l'outillage sur les machines de production. Pour que tous « apprivoisent » cette technique, AXON' CABLE (2150 salariés) a créé un « Fab Lab Café » dans l'entreprise, où tout est gratuit (Arduino, filament plastique...) et où les salariés, n'ayant pas appris les technologies 4.0 à l'école, peuvent amener leurs enfants et leurs amis. En faisant des objets pour eux et sur leur temps privé, cela forme les salariés et leur donne des idées qu'ils pourraient appliquer dans l'entreprise : c'est le retour sur investissement pour l'entreprise.

Contact : joseph.puzo@gmail.com

3. Quelles sont les questions posées par l'impression 3D ? Quelles sont les problématiques ?

Il y a de multiples technologies (voir l'annexe 1 qui dénombre 7 « familles », chacune d'elle ayant un nombre important de variantes). Chacune d'elle a des avantages et des inconvénients en matière de coût, de précision, de rapidité d'exécution...etc. De plus, le choix dépendra énormément des applications : utiliser une imprimante 3D pour faire un cadeau original à votre fille sera différent de fabriquer en série des composants de sécurité pour un avion de ligne.

La chaîne de valeur, résumée dans le diagramme ci-dessous, est assez complexe et toutes les étapes doivent être intégralement maîtrisées pour réaliser une offre globale. Les « briques » foncées nous paraissent les points essentiels, le reste pouvant plus facilement être sous-traité. Une redistribution de la création de valeur le long de la chaîne productive aura donc certainement lieu.



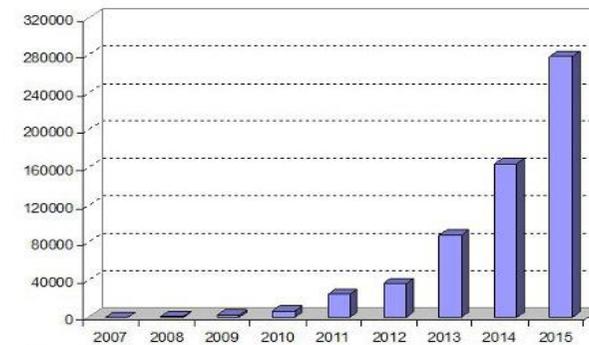
En particulier on notera l'importance de la partie numérique qui se développe très rapidement. Comme dans le cas de l'usine 4.0, les fabricants de machines devront développer des « jumeaux numériques ou *digital twin* » pour les différentes techniques de l'impression 3D. L'autre point compliqué est la maîtrise du comportement des matériaux en cours de production car cette technique transforme la matière. Dans le cas des pièces métalliques par exemple, il y a une métallurgie spécifique qu'il s'agit de comprendre. Ce sont là des domaines où la France a des compétences qui peuvent être utilisées.

4. Quels sont les enjeux : économiques, stratégiques, industriels, éthiques (Homme augmenté...), écologiques (déchets, recyclage...), sociaux, juridiques (propriété intellectuelle...)...?

4.1. Enjeux économiques mondiaux

Les enjeux sont considérables et concernent de nombreux secteurs. Les prévisions de croissance du marché mondial de la fabrication additive à l'horizon 2020 (vente de machines, consommables et services associés) varient entre 11,7 et 21,2 milliards de \$, selon les cabinets d'étude (cf. étude de la DGE/CGET citée en préliminaire).

Les enjeux dépendent énormément du marché applicatif visé : si on reprend l'exemple des imprimantes 3D « familiales », il y a beaucoup d'études de marché mais à prendre avec un certain recul.



Source: Wohlers Report 2016

Evolution de la vente d'équipements et de consommables ainsi que de services d'impression 3D depuis 2007 d'après le rapport Wohlers 2016. En 2015, le marché de l'impression 3D était de 5,165 milliards de \$. En 2016, toujours selon Wohlers (rapport 2017), il a atteint 6,063 milliards de \$, soit 17,4% de croissance par rapport à 2015

En tous cas, les avis sont unanimes : il y a un grand potentiel, probablement surévalué comme souvent dans ce genre de situation mais pourtant bien réel.

4.1.1 Les enjeux concernent la **conception et le design** grâce à la rapidité avec laquelle le produit peut être modifié, adapté à la demande des clients (changement de quelques lignes de code et relance de l'impression). Ces technologies sont révolutionnaires dans les phases de prototypage. C'est d'ailleurs historiquement leur première application (aéronautique, automobile).

Dans le même ordre d'idée mais en allant au-delà, c'est une source importante d'innovations car il est possible d'inventer des formes totalement nouvelles avec des géométries plus complexes, d'intégrer davantage de fonctionnalités, réduisant ainsi le nombre d'étapes d'assemblage.

Ceci donne donc une grande liberté de design, permettent de tester une grande variété de prototypes ainsi que leur qualité avant la production industrielle, réduisant ainsi le délai de développement du produit. C'est particulièrement important pour une personnalisation esthétique des produits. En particulier pour les objets de luxe, il est possible de libérer la création et d'aller à l'ultra-personnalisation (ex. chaussures, vêtements..., voir **encart 2**). Ces potentialités pourront cependant aussi susciter l'arrivée de nouveaux acteurs en France et remettre en cause les positions dominantes (secteur du luxe par exemple).

De plus, modèle numérique et modèle physique pourront être développés simultanément (design dynamique).

Encart 2 - Personnalisation (secteur du luxe) *

De nouvelles opportunités pour la création

La possibilité de transformer une création originale décrite numériquement en un objet tridimensionnel libère complètement le travail de création. L'impression 3D peut aussi être combinée aux savoir-faire de production traditionnels pour les préserver. Il sera par ailleurs important de définir le droit de la propriété de la création.

De l'ultra personnalisation à la co-crédation ?

Le créateur pourra travailler de façon étroite avec son client sur un objet de luxe tout à fait personnel et sur-mesure qui pourra être fabriqué dans un délai très court.

Vers la dématérialisation des vêtements ?

Le futur de l'impression 3D dans l'industrie de la mode sera selon certains la dématérialisation. Les stylistes créeront leurs fichiers 3D avant de les vendre directement au public. Il sera possible d'acheter le design en ligne et d'imprimer ensuite l'objet désiré.

*travail de l'Académie des technologies en cours de finalisation (1^{er} semestre 2018) à propos de l'impact des technologies de demain sur l'écosystème de la mode

4.1.2 Des enjeux concernant **la maintenance** grâce à la possibilité d'imprimer localement une pièce de rechange/détachée ou un composant par simple envoi du fichier, évitant ainsi le transport à grande distance de grandes pièces par exemple, ainsi que le stockage des pièces en général. Ceci a donc un impact potentiel sur la chaîne d'approvisionnement de matériels et sur la gestion des unités de stockage.

4.1.3 Les outils d'optimisation topologique 3D de la forme permettent de dessiner des pièces engageant le moins de matière possible pour une application donnée. Cette possibilité, couplée au principe même de la fabrication additive (procédant par ajout de matière au lieu de le faire par enlèvement), permet de réduire de façon importante la quantité de matière nécessaire pour un produit donné. Il semble que cela permette également des gains sur l'énergie engagée, globalement, pour la réalisation de la pièce. La valeur ajoutée obtenue par ce gain de performance intrinsèque et fonctionnelle compense ainsi le prix de fabrication généralement plus élevé.

4.1.4 Enfin, la « gamme » de fabrication d'un produit est généralement plus courte car l'opération de fabrication additive peut remplacer plusieurs opérations avec des procédés plus classiques. D'où des gains en matière de délai et de logistique. Cependant, la productivité des procédés classiques est souvent bien meilleure. Il faut donc étudier au cas par cas, pièce par pièce, ce qui peut effectivement être gagné.

4.1.5 Enjeux sur les investissements. Les coûts d'investissements pour des nouveaux entrants seront probablement modestes par rapport aux coûts nécessaires pour s'équiper de techniques de production plus traditionnelles. Ce sera en particulier le cas pour les pays en voie de développement. A condition de pouvoir maîtriser la technologie, ceci permettra plus de développements locaux à la fois du point de vue des investissements et de celui de la formation nécessaire.

4.2 Cas de la France

4.2.1 Il y a des acteurs industriels positionnés sur la chaîne de valeur (machines, matériaux, pièces et services), proposant chacun des technologies différentes. De nombreuses opportunités existent pour eux (voir **encarts 3 et 5**, et **annexe 2 - section 2**).

Encart 3 - L'accompagnement des grands acteurs industriels dans leurs innovations et procédés de production, dans leur transformation numérique

Prodways Group, pôle impression 3D du Groupe français Gorgé, a consolidé sa position sur l'ensemble de la chaîne de valeur (machines, matières, pièces et services) par l'acquisition stratégique de certaines entreprises (à titre d'exemple AvenAo en 2017, intégrateur des applications de conception et de développement 3D Dassault Systèmes). Son objectif est de devenir le 3^e acteur mondial du domaine. Il élargit ainsi l'offre pour l'industrie dans les secteurs notamment de l'aéronautique et du médical pour accompagner la transformation numérique des entreprises (Prodways a par exemple signé un partenariat avec Safran en 2017).

Le Groupe concentre aussi ses activités sur le « rapid manufacturing », impression 3D appliquée aux séries industrielles. Il proposera dès février 2018 une imprimante industrielle utilisant la technologie RAF (Rapid Additive Forging) pour produire en série des pièces de grande taille en titane, dont la qualité métallurgique répond aux exigences du secteur aéronautique. Des acteurs de l'aéronautique estiment que cette technologie pourrait être appliquée à près de 50% des pièces en titane utilisées dans la fabrication d'avions.

4.2.2 Pour les grandes entreprises utilisatrices, il faut différencier le domaine des pièces en polymère (déjà largement industriel) de celui des pièces métalliques, voire de celui d'autres « matériaux » (verres, sables, tissus vivants, bétons...). Chaque cas est vraiment très différent.

Dans le domaine des matériaux métalliques, par exemple, l'aéronautique est fortement impliquée dans le développement de ses produits avec ces technologies car il y a des enjeux très importants au niveau des pièces de rechange, sur la possibilité d'alléger encore plus les structures et sur les gains en matières premières et en énergie au cours de la fabrication. Cependant, malgré cette implication qui se traduit par une expérience en matière de prototypage de plusieurs années déjà, très peu de pièces métalliques dites non critiques sont aujourd'hui certifiées (par exemple 4 dans le cas de Safran, 1 dans le cas de GE Aviation). Le chemin pour fabriquer des pièces dites critiques est encore long car il est nécessaire de construire la robustesse des procédés de fabrication. De plus, la stratégie adoptée par les acteurs industriels positionnés sur la chaîne de valeur citée précédemment freine l'utilisation généralisée de cette technologie (voir **encart 4 et annexe 2 - sections 3 et 4**). Cette stratégie sera rapidement remise en question par la concurrence chinoise et américaine.

Encart 4 - La stratégie adoptée par les fabricants d'imprimantes et de matières premières versus le plus grand développement des pièces imprimées

Selon Safran Additive Manufacturing (SAM)*, il y a des rendez-vous à ne pas manquer dans tout programme de développement aéronautique. Dans le cas d'un nouvel avion tel que le A350 certifié il y a bientôt 3 ans par exemple, on sait déjà à quel moment il y aura une opportunité pour introduire des changements de technologie. Il ne faut pas la rater. Cela implique d'avoir fait la démonstration technique et industrielle de la technologie.

Aujourd'hui, les besoins pour les nouveaux avions certifiés se situent au niveau de l'optimisation des coûts, des délais et de la qualité, pas au niveau du re-design des pièces et de leur allègement. Les fabricants doivent adapter leurs produits aux besoins des industriels, adapter les prix qui aujourd'hui sont un véritable frein à l'utilisation plus généralisée de ces technologies car les potentialités sont importantes. Ils en prennent conscience progressivement.

* SAM est la nouvelle entité créée en 2015 pour accompagner la généralisation de la fabrication additive au sein du Groupe Safran et pour conduire des programmes de R&D produits et services

Voir aussi en **annexe 2, sections 3 et 4**

Le secteur de l'automobile est dans une situation différente car les séries y sont beaucoup plus importantes. La vitesse à laquelle la fabrication additive pourrait concurrencer des procédés éprouvés et optimisés pour de grandes séries n'est pas encore claire. Cela étant, l'évolution en cours des performances des imprimantes, précisément pour l'impression métallique rend de plus en plus envisageable la production de masse. MICHELIN est le 1^{er} cas (voir **encart 5**). Desktop Metal, start-up américaine, va fournir cette année des machines dont la vitesse de production des pièces dites « vertes »⁷

⁷ Une pièce verte est une pièce intermédiaire obtenue après injection à chaud et sous pression dans un moule d'une poudre métallique et d'un liant à base de polymère, dans le procédé MIM

a été multipliée par 100 (*impression 3D metal low cost solution*). L'impression métal devrait s'envoler en 2018.

En revanche, il peut y avoir des enjeux importants concernant la personnalisation du véhicule mais aussi la fabrication des outillages utilisés par cette grande industrie. C'est ainsi le cas de AddUp, qui fabrique notamment des outillages de pneus par fabrication additive (**encart 5**). D'une manière générale, la fabrication d'outillages est d'ailleurs un enjeu important même hors automobile.

Encart 5 - AddUp, une co-entreprise MICHELIN – FIVES

AddUp a été créée en 2015 pour proposer le savoir-faire combiné de ces Groupes à d'autres entreprises en matière de machines et des solutions d'impression 3D métal. MICHELIN par exemple déploie à l'échelle industrielle la fabrication additive de 650000 lamelles métalliques par an pour ses moules de cuisson de pneu (1^{er} grand succès industriel mondial). Les designs spécifiques possibles et diversifiés de moules de cuisson des pneus obtenus grâce à la fabrication additive de ces lamelles permettent en effet de jouer sur la sculpture des pneus, donc sur leur performance, jamais atteinte auparavant.

Cette co-entreprise anime un programme de recherche appliquée sur 6 ans dans le domaine de la fabrication additive métallique, SOFIA, qu'elle a initié fin 2016. Ce programme qui associe industriels et académiques est axé sur le développement de l'ensemble de la chaîne de production (élaboration des poudres, équipements et procédés d'impression) pour répondre en particulier aux exigences de l'industrie aéronautique. Il est financé par BPI France dans le cadre d'un PIA.

Voir également en **annexe 2 pour les voies de captation de la valeur ajoutée**

De même pour les verres, on pourra viser le marché des bouteilles de parfum où la différenciation par la forme et la couleur est majeure. Ce ne sera pas le

cas pour les bouteilles de vin ou de bière « grand public », par exemple (voir **encart 6**).

Encart 6 - Secteur de l'emballage verrier pour boissons et produits alimentaires

Cette technologie est surveillée de près par les grands acteurs du domaine comme VERALLIA (3^e producteur mondial). Des travaux très intéressants du Karlsruhe Institute of Technologie montrent que des objets en verre d'une grande précision dimensionnelle peuvent être réalisés avec un état de surface de plus en plus lisse.

Un point fort de cette technologie est effectivement de faciliter la différenciation entre article (dans le respect de ce que la résistance mécanique du matériau autorise par rapport à l'usage qui sera fait de l'objet) en plus de pouvoir s'affranchir de toute moulure.

La recyclabilité des produits finis sera un point clé pour permettre un éventuel changement de procédé. Le verrou majeur aujourd'hui reste les temps de cycle qui sont très éloignés des vitesses de production. Compte tenu de cela, à moins d'une invention de rupture permettant de faire un bond dans la vitesse d'impression, tout en bénéficiant d'une matière première recyclée (à iso-coût, voire moindre) et de déboucher sur un coût global de fabrication compétitif, une retombée possible n'est pour le moment pas entrevue dans ce secteur d'activité.

Dans le secteur du bâtiment, des initiatives existent. Elles concernent majoritairement l'impression 3D directe (sur site) ou indirecte (réalisation d'éléments de structure en usine et assemblage sur site) de maisons individuelles et de bureaux, à partir de bétons, mortiers et argiles⁸. Peu d'exemples concernent l'impression 3D d'immeubles. Bouygues Construction

⁸ En France par exemple, Lafarge et la start-up XtreeE pour la réalisation d'éléments de structure de maisons bas carbone, Constructions 3D pour l'impression 3D sur site de maisons

a mené une expérience de coulage du béton, mais le Groupe en est aux prémices de la technologie.

Les exemples ci-dessus montrent que l'industrie lourde française s'est déjà largement mobilisée⁹.

Il serait important pour la France de promouvoir et d'accompagner cet écosystème formé par l'ensemble des acteurs mobilisés sur la fabrication additive. Il y a là une véritable opportunité de reconstruire une filière machine-outil française spécifique et de soutenir le développement d'une filière additive qui pourra avoir une place non négligeable dans les usines de demain.

4.2.3 Le cas des ETIs et PME

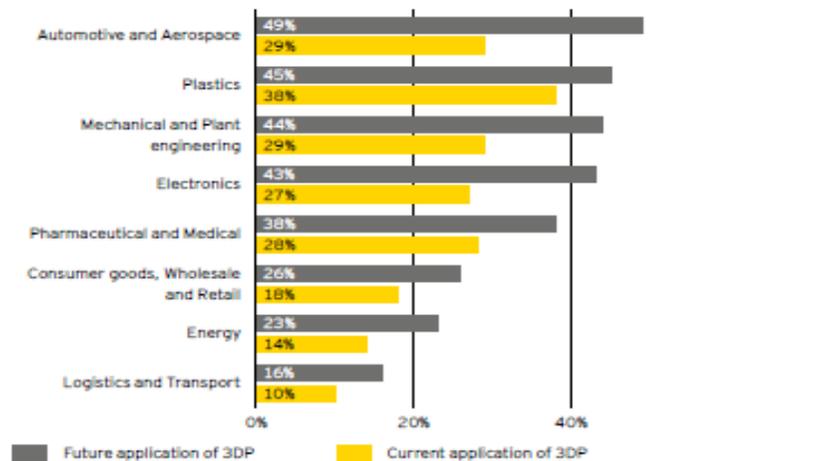
L'encadré 1 montre que certaines entreprises se sont déjà bien engagées dans cette évolution. Cependant, selon Ernst & Young¹⁰, environ 75% des 900 entreprises prises en compte dans leur étude (au niveau mondial) n'ont aucune expérience de l'impression 3D. La principale raison invoquée est le manque d'information sur ses capacités.

Une croissance en matière d'adoption des techniques de fabrication additive par tous les secteurs est néanmoins attendue au cours des prochaines années.

Ceci souligne l'importance de la sensibilisation et de la formation (voir § 4.3.4 et **encarts 7 et 8**). Il y a en effet peu de secteurs qui ne soient, finalement, touchés. Autant, la prudence est recommandée, autant l'absence de réaction serait grandement préjudiciable.

⁹ Voir en **annexe 2** quelques autres remarques générales sur le sujet

¹⁰ How Will 3D Printing Make Your Company The Strongest Link In The Value Chain ?, Ernst & Young's Global 3D Printing Report 2016



Evolution de l'adoption par les entreprises des techniques d'impression 3D selon Ernst & Young – étude portant sur 900 entreprises dans 12 pays dont les USA (200), la Chine et la Corée du sud (170), la France (80), l'Allemagne (200) et l'Angleterre (100)

4.3 Autres enjeux

4.3.1 Enjeux en matière d'emploi

C'est évidemment un point crucial pour notre pays. Les technologies développées nécessiteront de nouvelles compétences et en rendront obsolètes d'autres. L'effet global est difficile à estimer et le cadencement dans le temps encore plus. On ne peut qu'insister sur la formation nécessaire à plusieurs niveaux pour ne pas « rater le coche » sous peine de voir supprimer des emplois chez nous et en voir se créer ailleurs.

Globalement, la technologie va se développer, bien qu'on ne sache pas encore dans quelle proportion. Il faut donc évaluer les impacts sociétaux au cas par cas (déplacement des industries traditionnelles). Ceci est particulièrement critique pour aider à la transformation de l'industrie mécanique (sujet largement traité par la Fédération des Industries Mécanique

- FIM et l'Académie des technologies). Les pays en retard en formation 4.0 seront aussi en retard en réindustrialisation.

4.3.2 Enjeux environnementaux

Sur le plan environnemental, l'impression 3D nécessite moins de matières premières et produit moins de déchets que l'usinage par découpe. Son utilisation posera cependant de façon nouvelle la question du recyclage des co-produits et déchets néanmoins engendrés. Le bilan énergétique semble également favorable. Il faut néanmoins faire une analyse de cycle de vie (ACV) au cas par cas.

4.3.3 Enjeux d'aménagement du territoire

L'impact en matière d'aménagement du territoire peut aussi être important car ces technologies incitent à la relocalisation de la production près du client utilisateur. L'étude précédemment citée indique qu'un peu plus de 40% des 900 entreprises interrogées à travers le monde pensent que cette technologie impactera la localisation des usines. Cette relocalisation s'amplifiera encore avec les produits innovants de demain.

4.3.4 Enjeux de formation

L'impression 3D pourrait avoir une utilité dans le domaine de la formation :

- (i) formation générale, où dans les cours de technologie pour tous, sa généralisation permettrait de « toucher la matière », des exercices de création et design, de conception (dont codage élémentaire), de fabrication de produits familiers. La dimension ludique ajouterait un attrait à ces enseignements ;
- (ii) formation professionnelle où le renforcement de sa présence accompagnerait une montée en compétences dans le champ de la conception innovante et du design (voir aussi **encart 8** en complément).

Dans les deux cas, la fabrication additive est une source d'expérimentation, de sensibilisation au réel par rapport au virtuel.

De plus, la possibilité de passer, de plus en plus facilement, d'une image en deux ou trois dimensions à un objet peut avoir un impact extrêmement positif sur la culture technique de chacun. Ceci peut contribuer à redonner de la valeur aux processus d'apprentissage et aux métiers techniques. L'Education Nationale devrait donc s'approprier ce nouvel outil.

Encart 7 - Des leviers possibles pour la montée en compétence des PME

D'après Sculptéo*, 2 approches sont nécessaires : / une communication sur les capacités des technologies d'impression 3D devrait être organisée par les pouvoirs publics pour convaincre les équipes de direction technique de les adopter / La possibilité de recruter gratuitement sur une période de 2 ans le 1^{er} ingénieur.

*Sculptéo, leader mondial français de la fabrication digitale, offre un service en ligne d'impression 3D et de découpe laser professionnelles. L'entreprise propose aussi une production sur demande de prototypes, produits individuels et petites séries

Contact : eric.carreel@gmail.com

Encart 8 - Le point de vue d'une ETI sur les connaissances de base en 4.0

D'après AXON'CABLE, l'impression 3D tout comme les objets connectés, est un des sous-ensembles de l'industrie 4.0. L'industrie 4.0 doit s'enseigner comme de la culture générale de base dès le collège, voire le primaire. Les connaissances de base en 4.0 sont les suivantes :

Conception de dessins en 3D (il y a des logiciels gratuits : 1-2-3 design...), **impression 3D** (il suffit de brancher une imp3D plastique à 500€ sur la sortie USB du PC), **découpe laser** (permet de la production 3D en strato-conception : coût de la machine laser 1,5K€), **programmation ARDUINO** (1 automate Arduino = 10€), **anglais technique** (50 mots à apprendre pour programmer facilement l'ARDUINO), **utilisations de capteurs, de LED et de moteurs** (le kit Arduino très complet coûte 50€).

Il y a des initiatives intéressantes dans ce sens de la part d'industriels. L'entreprise AddUp, déjà citée propose aujourd'hui d'acquérir gratuitement des connaissances de base en impression 3D grâce à des formations en ligne (MOOC) sur un site dédié.

Il y a donc des potentialités en matière d'aide à la formation. Il y a, par ailleurs des enjeux du côté du besoin en formation avec la nécessité de formations spécialisées car la technologie demande des connaissances en matériaux, logiciels, contrôle, etc... C'est un point important et urgent.

4.3.5 Enjeux juridiques

La technologie va permettre que toute l'information relative à une fabrication puisse être, au moins partiellement, reproduite et copiée comme on le fait pour un logiciel. Il faudra donc sans doute modifier certaines règles de propriété industrielle entre droit des brevets et droit des logiciels. Ainsi, faudra-t-il peut-être enregistrer ses modèles à l'INPI.

La contrefaçon sera également grandement facilitée. Il y aura donc la question de la traçabilité des pièces. La question de la traçabilité pose celle de la certification et de la qualité réelle des pièces réalisées. Les acteurs se positionneront très certainement sur la traçabilité de la qualité. La sécurisation numérique (crypto) des données sera un levier pour accompagner les applications exigeantes en termes de sécurité.

5. De façon prospective, en quoi l'impression 3D pourrait-elle bouleverser les modes de production ?

Beaucoup de points ont été abordés dans le paragraphe précédent.

C'est une révolution pas seulement pour la production, mais aussi pour l'organisation de la structure des usines et des laboratoires ainsi que des méthodes de distribution. C'est la conjonction du progrès des ordinateurs, du calcul des structures, de la robotique généralisée, des matériaux et de la maîtrise de l'ensemble qui créera la rupture.

Les secteurs les plus concernés ont déjà commencé leurs travaux pour utiliser la technologie. Il y aura de nouveaux acteurs qui fourniront des machines, des logiciels interfacés avec les grands logiciels de CAO, mais aussi des acteurs actuels qui auront su évoluer (usineurs, traitements de surface, fabricants de matériaux, fournisseurs d'outils de contrôle, ingénierie fournisseurs d'usines « clé en main », etc..).

De nombreux acteurs (industriels et académiques) ont pris des initiatives pour travailler en réseau, capitaliser leurs connaissances et en acquérir de nouvelles, ainsi que cela a été évoqué précédemment. Il faut les soutenir et les renforcer. En Allemagne, aux USA, à Singapour, en Chine, ...des centres de référence coordonnés émergent (au moins dans les présentations). Ceci pose la question d'une coordination nationale (via le CETIM ? Les Instituts CARNOT ?...).

6. Où en est la recherche, en particulier en France et en Europe par rapport aux autres continents ? En particulier, y mène-t-on des recherches en impression 3D de pointe (bio-impression, impression 3D du graphène, nano-impression, impression 4D, etc...) ?

Il y a beaucoup d'activités de recherche en France dans pratiquement tous les domaines, à un bon niveau. En particulier, il y a des équipes dans tous les domaines que vous évoquez (bio-impression, impression 3D du graphène, nano-impression, impression 4D, etc.). Le sujet est plutôt sur leur coordination « souple » afin d'éviter les doublons tout en maintenant une grande liberté aux innovateurs. Ainsi, l'AIF avec le CETIM cherche à faire un minimum de coordination et chaque région cherche à se spécialiser (c'est encore embryonnaire).

Par ailleurs, des regroupements importants se mettent en place : citons la création d'une plateforme de fabrication additive au CEA Saclay, le AFH (Additive Factory Hub, inaugurée en décembre 2017) pour accélérer le développement de l'impression métallique, pilotée par le CETIM et le CEA. Elle réunit des acteurs académiques et industriels (utilisateurs finaux et fournisseurs de technologies tels que Safran, Dassault systèmes, EDF...) pour des projets de R&D mutualisés et pour faciliter les transferts technologiques vers les PME. Ce dernier point est important pour leur montée en compétence technologique, problématique largement traitée par l'Académie des technologies¹¹.

Il y a de grands programmes nationaux aux USA, en Allemagne, au Japon et en Chine (cette dernière a lancé des programmes 3D en 1995 et depuis 2005 elle y a investi des sommes considérables), avec des aspects académiques de bon niveau, mais aussi industriels.

¹¹ Conclusions sur cette problématique à paraître au 2^e semestre 2018

7. Les règles existantes (France, Union européenne, international) sont-elles adaptées ?

Il y a des normes qui sont déjà publiées ou en cours d'élaboration (le groupe de travail ISO/TC 261 prépare une norme sur le sujet depuis 2013, au niveau européen le comité technique CEN/TC 438 a été mis en place en janvier 2015). Un des groupes mis en place par l'AIF traite de ce sujet encore mouvant (CETIM...).

Pour l'instant ce sont des règles d'autres origines (environnementales telles que REACH ou RoHS, gestion des personnels, sécurité des personnes et des produits, principe de précaution, etc..) qui peuvent être applicables, mais il n'y a rien de vraiment spécifique à la fabrication additive. Pour le secteur médical par exemple, il n'y a pas d'environnement dédié à la fabrication additive au LNE -GMED, organisme de certification.

En revanche, il faudra prévoir des évolutions réglementaires pour anticiper les difficultés probables dues à la démocratisation de la technologie (voir § 4.3.5 concernant l'évolution des règles de PI et de contrefaçon).

Il s'agit de trouver le bon dosage, entre la création de normes qui permettent de partager un contexte commun, sans dresser de barrières trop contraignantes à la démocratisation des technologies.

En revanche, les secteurs très réglementés tels que l'aéronautique ou le médical doivent s'appuyer sur des normes claires.

8. Faut-il une intervention de la puissance publique (France, Union européenne) et si oui laquelle ?

Comme indiqué ci-dessus, un minimum de coordination des interventions de la puissance publique aux différents niveaux géographiques serait bienvenue (PIA, DGE, DGRI, Régions, départements, métropoles, etc...). Ceci concerne à fois les initiatives de soutien financier à la formation (initiale ou continue), à la recherche, au développement ou au déploiement industriel. La stratégie nationale nécessite donc un savant dosage entre coordination, centralisation, initiative privée et délégation des décisions à différents niveaux géographiques.

L'Etat a, en particulier, un rôle stratégique à jouer pour susciter des recherches, du développement et de l'innovation sur les points critiques suivants correspondants aux points jugés importants dans la chaîne de valeur (§ 3) :

- Développement de nouveaux matériaux de déposition et coordination de l'expertise matériaux au niveau national
- Développement des machines, des logiciels, leur sûreté (cryptage) et leur interfaçage
- Automatisation et intégration ainsi que la maîtrise des procédés pour l'augmentation des performances
- EVENTUELLEMENT en SUSCITANT la création de centres d'excellences

ANNEXE 1 : familles de procédés, matériaux utilisables

Les transparents suivants ont été fait par le pôle Materialia (<https://www.materialia.fr/>) dans le Grand Est.

La fabrication additive : de nombreux procédés

7 familles de procédés

Vat photopolymerization

Binder Jetting

Material extrusion

Direct energy deposition

Material Jetting

Powder bed Fusion

Sheet lamination

Table 1 – Overview of the processes categories and the typical associated feedstock

Materials	Example materials	Process categories						
		Vat photo-polymerization	Material jetting	Binder jetting	Powder bed fusion	Material extrusion	Directed energy deposition	Sheet lamination
Thermoset Polymer	Eponies and acrylates	X	X					
Thermoplastic polymer	Polyamide, ABS, PPSF		X	X	X	X		X
Wood	paper							X
Metals	Steel, Titanium alloys, Cobalt chromium			X	X		X	X
Industrial ceramic materials	Alumina, Zirconia, Silicone nitride	X		X	X			X
Structural ceramic materials	Cement, Foundry sand			X	X	X		

Note: Combinations of the above material classes, e.g. a composite, are possible.

Les types de procédés sont assez différents : d'une manière générale, on amène du matériau sous forme de poudre de fil de plaque fine ou de liquide. La matière est fondue, modifiée, travaillée ou déposée par des robots articulés 3D pilotés numériquement. Suivant la matière traitée (métal, polymères, céramiques, verres, tissus vivants, aliments, cartons, bétons, briques, etc..), il y a évidemment des technologies concrètes très différentes même si les concepts de base du design des produits et du pilotage numérique en 3D des robots sont les mêmes.

La fabrication additive: Matériaux utilisables

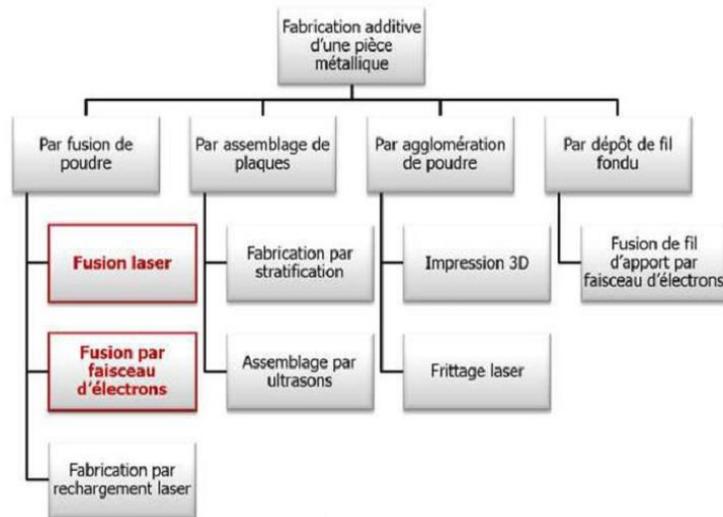


Organic materials	Ceramic materials	Polymeric materials	Metallic materials
Waxes	Alumina	ABS	Aluminium
Tissue / cells	Mullite	Polyamide (nylon)	Tool Steel
Wood, Cardboard	Zirconia	Filled PA	Titanium
	Silicon Carbide	PEEK	Inconel
	Beta-Tri calcium Phosphate	Thermosetting epoxies	Cobalt Chrome
	Ceramic (nano) loaded epoxies		Copper
	Silica (sand)	PMMA	Stainless steel
	Plaster	Polycarbonate	Gold / platinum
	Graphite	Polyphenylsulfone	Hastelloy
		ULTEM	
		Aluminium loaded polyamide	
Multimaterial – multifunctional systems			

On voit ici tous les types de matière qu'il est possible de traiter. On conçoit bien que le type de machine sera différent lorsque le produit à réaliser sera en titane ou en silice. Notons toutefois que la possibilité de déposer plusieurs matériaux « pas trop différents » sur une seule machine « multi-tête » peut être très attractive. L'hybridation des procédés est en effet une tendance récente très notable : il y a deux têtes de robots dans une même enceinte déposant des matériaux différents.

La fabrication additive : de nombreux procédés

MÉTAL

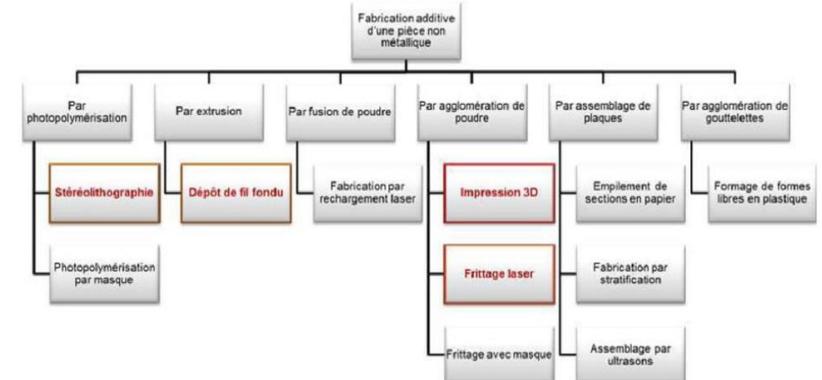


Pour le métal, il y a 4 grandes classes de technologies en partant de poudres de plaques ou de fils. Le choix de la technologie est délicat. Lorsqu'on fond un métal, l'oxydation est un problème et il faut donc travailler sous vide ou sous atmosphère inerte. La poudre permet un état de surface « acceptable » pour certaines applications. Il faut néanmoins développer des traitements spécifiques car réuser des pièces 3D compliquées n'est pas toujours possible. Le fil permet des productivités meilleures mais ne permet pas toutes les formes. La France jouit d'une position enviable pour le rechargement laser (société BeAm déjà citée) et la fabrication à partir de plaques par stratification¹².

¹² <https://cirtes.com/>

La fabrication additive : de nombreux procédés

NON METAL



La fabrication additive a commencé pour les polymères grâce à des techniques de polymérisation ou réticulation dans le volume au moyen de lasers. Ceci est largement industrialisé. Il y a encore beaucoup de recherches dans le domaine pour trouver des matériaux gardant de bonnes propriétés dimensionnelles tout en permettant des cadences élevées. Le domaine est déjà largement développé avec de nombreux industriels proposant des produits.

ANNEXE 2 : Autres éléments d'intérêt

1/ Liste d'entreprises intéressantes dans le cas particulier de la fabrication additive métallique

Acteurs intervenant sur le marché français (non exhaustifs)
Fournisseurs de poudre <ul style="list-style-type: none">• ERASTEEL (filiale ERAMET)• COOKSON (métaux précieux)• Praxair...
Fabricants de machines <ul style="list-style-type: none">• BEAM Machines (France)• Fives Michelin Additive Solutions (France)• EOS (Allemagne)• 3D Systems (USA)• Realizer (Allemagne)• Concept Laser (Allemagne)• ...
Prestataires (concepteurs/ designers, imprimeurs, usineurs...) <ul style="list-style-type: none">• 3A• 3D&P• AFU• AGS Fusion• Cresilas• ERPRO• Fusia• GM Prod• Initial• OMG• Poly-Shape• Prismadd• Volum-e• ...

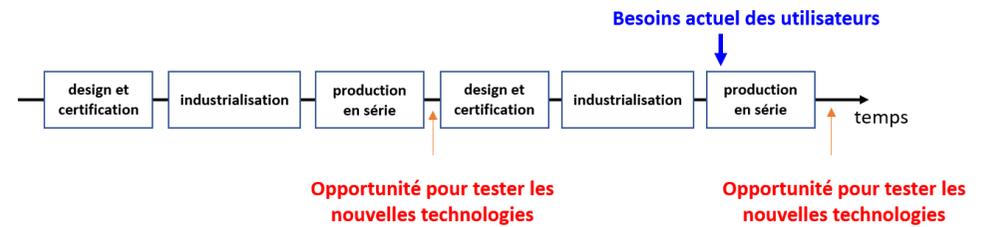
2/ Les autres voies de captation de la valeur ajoutée liée à l'impression 3D dans les processus de production pour différents secteurs évoqués par un spécialiste du domaine, AddUp

- La conception d'avions de nouvelle génération dans le **secteur aéronautique**. En raison des contraintes réglementaires, le processus de requalification des pièces obtenues par fabrication additive sur les avions existants entraîne en effet un surcoût.
- Dans le **secteur de l'outillage**, les gabarits, moules et outils d'assistance opérationnelle utilisés tout au long des processus de fabrication est une réalité industrielle à court terme pour la production en grande série. Par exemple, dans le moulage par injection plastique, l'atout de la technologie est en effet la capacité à fabriquer des moules plus efficaces en termes de refroidissement, impactant la vitesse de réinjection du plastique, et donc l'augmentation des cadences de production.
- Dans le **secteur automobile**, outre les possibilités d'impression des composants intérieurs et extérieurs non structurels, de personnalisation esthétique de masse pour une plus grande pénétration du marché, l'analyse de la chaîne globale depuis la conception jusqu'au transport est aussi nécessaire. Il faut s'interroger sur la manière dont cette technologie peut être utilisée pour obtenir des résultats inabordables autrement, ne pas chercher par exemple à réduire les coûts de fabrication à iso-design. D'autre part, certains acteurs souhaitent faire vivre leurs modèles. Les pièces de collection sont un créneau à regarder.
- La fabrication additive pourrait aussi accompagner la dynamique du **marché de l'énergie** qui se transforme avec l'introduction des

énergies renouvelables et le développement des systèmes de stockage (H₂, électricité) et de recharge, au plus près des usages.

- Le **secteur médical** est un marché très structuré et réglementé. Il y a 2 approches : démontrer qu'il est possible d'apporter de la robustesse à l'exploitation industrielle ; montrer sa capacité à accompagner l'innovation (ex. du partenariat avec Carmat). Par ailleurs, la personnalisation fonctionnelle de dispositifs médicaux (prothèses, implants...) tirera le développement de la technologie.
- Enfin, dans toute analyse d'intégration de cette technologie dans une chaîne de production, il est indispensable de prendre en compte le coût d'usage des imprimantes et des produits imprimés utilisés dans les procédés de fabrication.

3/ Les rendez-vous à ne pas manquer dans un programme aéronautique Selon Safran Additive Manufacturing



4/ La stratégie adoptée par les fabricants d'imprimantes et de matières 1^{ères} vs le plus grand développement des pièces imprimées

Le coût de fabrication d'une pièce métallique est réparti de la façon suivante :

- 50% pour l'obtention d'un brut (dont le coût de la matière 1^{ère} représente de 2-15%, le reste étant l'amortissement de l'imprimante)
- 50% pour la post-fabrication (finition de surface, traitements thermiques, machine...)

Le poids de la matière 1^{ère} (poudre métallique) qui est aujourd'hui perçue comme faible augmentera au fur et à mesure des progrès réalisés sur la post-fabrication.

Les fabricants doivent se positionner rapidement au bon niveau compte-tenu du besoin actuel des utilisateurs (voir **section 3/**).

ANNEXE N° 5 :
CONTRIBUTIONS DES AMBASSADES DE FRANCE



Ambassade de France en Allemagne
Service pour la Science et la Technologie

Berlin, 31 janvier 2018

*Rédactrices : Elisa Madani, stagiaire au Service Economique Régional
Philippine Régniez, chargée de mission Technologies numériques
au Service Scientifique et Technologique*

Etat des lieux de la recherche, du marché et de l'utilisation de l'impression 3D en Allemagne

Résumé :

L'Allemagne fait face aux mêmes défis dans le domaine de l'impression 3D que la plupart des pays où cette technologie a acquis une importance croissante (Chine, Etats-Unis, certains Etats membres de l'Union Européenne) : en termes d'usage, la fabrication additive tarde à se répandre dans les entreprises du Mittelstand (PME) et se cantonne pour le moment aux laboratoires de R&D de grands industriels (constructeurs automobiles, aérospatial). Un déficit de compétences persiste, qui fait que les entreprises ont du mal à recruter dans ce secteur.

Néanmoins, il faut souligner la position leader de l'Allemagne dans le domaine, tant par l'investissement important réalisé dans la recherche dès 2003, intensifié à partir de 2014 ; que par l'excellence historique allemande dans la production de machines de niche vendues en B2B. L'Allemagne peut donc se targuer d'être le fournisseur principal au niveau mondial des lasers et autres imprimantes 3D. En termes d'applications, des acteurs de tous les domaines expérimentent à petite échelle : prothèses médicales et dentaires, pièces utilisées dans l'industrie, personnalisation croissante des produits permise par la transformation des usages liés au numérique.

Mais si les sommes investies par l'Allemagne dans le secteur peuvent paraître importantes, elles le sont relativement peu au regard de la force financière de la première puissance économique européenne. L'Allemagne ne s'est d'ailleurs pas dotée d'une stratégie cohérente dans le secteur, bien que la recrudescence récente (2017) des publications et livres-blancs peut laisser supposer que le potentiel de la fabrication additive est de mieux en mieux perçus par les différents acteurs publics.

Sommaire :

Partie I	Le paysage allemand de la recherche scientifique dans l'impression 3D
Partie II	Dimension industrielle : acteurs et branches de l'impression 3D
Annexe	Synthèse des principaux acteurs allemands

TABLE DES MATIERES

Partie I – Le paysage allemand de la recherche scientifique dans l’impression 3D.....	3
I. Programmes fédéraux de soutien à la recherche	3
I. a. Programmes de soutien à la recherche par le Ministère de l’Education et de la Recherche (BMBF)	3
I. a. 1. La recherche en fabrication additive dans le cadre de la « Stratégie High Tech » du BMBF	3
I. a. 2. La recherche en fabrication additive dans le cadre du « Partenariat pour l’Innovation Zwanzig20 » du BMBF	3
I. b. Programmes de soutien à la recherche par le Ministère de l’Economie et de l’Energie (BMW)	4
II. Principaux centres de recherche (répartition géographique)	5
II. a. Dresde (Saxe)	5
II. b. Aix-La-Chapelle (Rhénanie du Nord – Westphalie)	5
II. c. Darmstadt (Esse)	5
II. d. Hambourg (Hambourg) et Potsdam (Brandebourg).....	5
III. Recherche par domaines d’application.....	6
III. a. Environnement.....	6
III. b. Médecine	6
Partie II. Dimension industrielle : Acteurs et branches de l’impression 3D.....	8
I. Forces et faiblesses des entreprises allemandes dans l’industrie de fabrication additive	8
I. a. Une croissance du marché soutenue	8
I. b. Disparité entre une forte offre du côté des fournisseurs et fabricant et une faible utilisation dans la pratique industrielle.	8
I. c. Causes des réticences des PME utilisatrices face à la technologie de FA.....	9
II. <i>Statu quo</i> et perspectives de développement de la FA à usage industriel et personnel.....	9
II. a. Champ d’application actuel.....	9
II. b. Perspectives à moyen et long terme.....	9
III. Dimension réglementaire	10
III. a. Cadre légal et nouveaux défis réglementaires de la fabrication additive.....	10
III. a. 1. Une situation juridiquement inconnue, entraînant des besoins de clarification.....	10
III. a. 2. Sécurité des produits et responsabilité des personnes privées comme défi à venir	11
Annexe 1 : Liste des principaux acteurs allemands	12
Annexe 2: Les 30 premiers déposants de brevets dans le domaine de la fabrication additive (2003-2012).....	14
Références & liens utiles	15

Partie I – Le paysage allemand de la recherche scientifique dans l'impression 3D

La recherche scientifique allemande en fabrication additive, ou impression 3D, ne bénéficie pas encore d'une stratégie cohérente comme cela peut être le cas en Chine ou aux Etats-Unis (TAB, 2017, p.98). La recherche en fabrication additive s'appuie d'une part sur le paysage institutionnel allemand (Instituts Fraunhofer, Centres de recherche des Universités, Centres Helmholtz) ; et d'autre part, sur des projets soutenus financièrement par le Ministère fédéral de l'Education et de la Recherche (BMBF – *Bundesministerium für Bildung und Forschung*) et coordonnés par des porteurs de projet (*projekträger*), qui réunissent le plus souvent différents groupes de recherche, acteurs industriels et start-up. Enfin, il peut arriver que d'autres domaines plus amplement mis en avant comme l'Industrie du futur (*Industrie 4.0*) ou la photonique comportent également une partie sur l'impression 3D sans que celle-ci ne soit particulièrement explicite.

I. Programmes fédéraux de soutien à la recherche

I. a. Programmes de soutien à la recherche par le Ministère de l'Education et de la Recherche (BMBF)

I. a. 1. La recherche en fabrication additive dans le cadre de la « Stratégie High Tech » du BMBF

S'il n'existe pas de stratégie de recherche en fabrication additive en tant que telle, cette technologie a néanmoins été identifiée récemment comme une « technologie clé » pour la société numérique et fait donc partie du programme de soutien à la recherche et à l'innovation « Stratégie High Tech » (BMBF, 2017, p.5). Entre 2003 et 2013, le gouvernement fédéral avait accordé un financement global de 21 millions €. C'est en 2013 que le BMBF prend conscience du potentiel de la fabrication additive ; celle-ci fait donc son apparition dans la Stratégie High Tech en 2014.

Ainsi, à partir de 2014, le gouvernement fédéral s'engage dans un processus de construction des compétences en impression 3D en Allemagne à travers les projets suivants :

- « Composants d'additifs haute performance en alliages de titane et aluminure de titane - contrôle de processus, caractérisation, simulation (addef) » soutenu par le BMBF à hauteur de 2.65 millions € entre 2014 et 2017
- « Production de valves cardiaques vitales utilisant l'ingénierie tissulaire et l'impression 3D (3D-TERM) », soutenu par le BMBF à hauteur de 3.45 millions € entre 2014 et 2017

En 2016, le BMBF finance pour la première fois un programme de recherche portant sur l'ensemble de la chaîne de valeur de la fabrication additive : c'est le projet « Fabrication additive – Produits personnalisés, produits complexes de masse, matériaux innovants (ProMat_3D) ». Le BMBF soutient pas moins de 23 projets de recherche dans ce cadre, pour un montant global de 41 millions €. Le détail des projets se trouve dans la brochure « [Deutschland druckt dreidimensional](#) ». Ce programme fait partie de la Nouvelle Stratégie High Tech 2020 mise en place en 2016.

I. a. 2. La recherche en fabrication additive dans le cadre du « Partenariat pour l'Innovation Zwanzig20 » du BMBF

Dans le cadre du Programme entre le BMBF et les Länder « Zwanzig20 – Partenariat pour l'Innovation » (*Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation*), qui encourage la coopération entre les centres de

recherche et les entreprises, le gouvernement fédéral a investi 45 millions € pour le projet « Fabrication additive-générative - La révolution 3D pour la production de produits à l'ère numérique ([AGENT 3D](#)) » entre 2013 et 2020. Le projet s'appuie sur quatre Instituts Fraunhofer (IWS ; IMW ; IPK ; IWU).

Le BMBF a également débloqué 30 millions € pour le développement de la photonique en 2013, et ce pour 15 ans. Cet investissement a été réalisé dans le cadre du projet de recherche « Campus de recherche – partenariat public-privé pour l'innovation » avec le cluster « Photonik » de l'Université RWTH d'Aachen (Rhénanie du Nord – Westphalie). Ce projet de recherche a des applications dans les technologies de fabrication additive.

Enfin, les PME innovantes allemandes peuvent être soutenues financièrement par le BMBF grâce aux programmes « PME innovantes : recherche dans la production » et « PME innovantes : recherche dans les matériaux ».

I. b. Programmes de soutien à la recherche par le Ministère de l'Economie et de l'Energie (BMWi)

Le Bundestag note que le BMWi a accru le volume de l'investissement dans des projets de recherche en fabrication additive, avec plusieurs exemples : (TAB, 2017, pp99-100)

- Au sein du projet plus large « Technologies numériques pour l'Economie (PAiCE) », les « technologies 3D » figurent en bonne position car elles sont vues comme un élément important de la transformation numérique.
- Le projet « M3D – Scan 3D mobile et Impression 3D pour le tournant industriel » a reçu 3.5 millions €. Durée du projet : 2016 – 2018.
- Le projet « SAMPL – Secure Additive Manufacturing Platform » a commencé en 2016 et dure 3 ans. Soutien du BMWi : 2.6 millions €.

D'après un rapport de l'équivalent allemand de l'OPECST (le TAB du Bundestag), l'Allemagne occupe une bonne place dans la recherche internationale sur la fabrication additive. Les auteurs mentionnent notamment une intensification des moyens investis et des projets menés dans le domaine à partir de 2015. La recherche se concentre notamment sur des problématiques technologiques ou applicatives mais très peu sur les aspects économiques ou d'usages.

Durée du programme	Principal financeur	Montant	Nom du programme	Stratégie – cadre
2003 – 2013	BMBF	20 millions €		Stratégie High Tech
2014 – 2017	BMBF	2.65 millions €	addef	Stratégie High Tech
2014 – 2017	BMBF	3.45 millions €	3D-TERM	Stratégie High Tech
2013 – 2020	BMBF	45 millions€	Agent3D	Zwanzig20
2013 – 2028	BMBF	30 millions€	Photonik	Zwanzig20
2016 – 2020	BMBF	41 millions€	ProMat-3D	Stratégie High Tech
2016 – 2021	BMWi	50 millions€	PAiCE	Digital Agenda
	TOTAL	186 millions €		

II. Principaux centres de recherche (répartition géographique)

Nous avons identifiés quatre centres majeurs de l'impression 3D en Allemagne (présentés par importance décroissante) : Dresde (Saxe), Aix-La-Chapelle (Rhénanie du Nord – Westphalie), Darmstadt (Esse) et Hambourg (Hambourg).

II. a. Dresde (Saxe)

L'Institut Fraunhofer pour les matériaux et les technologies de faisceau (IWS) s'est associé avec l'Université Technique de Dresde (TU) pour créer le Centre pour la fabrication additive de Dresde, le centre de compétence le plus important dans le domaine de l'impression 3D dans l'Est de l'Allemagne. Le projet de recherche « AGENT 3D », soutenu financièrement par le BMBF, est piloté depuis Dresde. Il réunit une centaine d'acteurs pour un financement annoncé de 45 millions €. Le domaine bénéficie par ailleurs du dynamisme du Cluster « Silicon Saxony » qui réunit des entreprises comme Siemens, l'Institut Fraunhofer IKTS ou encore l'Institut Fraunhofer IFAM. Dresde collabore également avec le centre de recherche de Jühlich (JFZ).

II. b. Aix-La-Chapelle (Rhénanie du Nord – Westphalie)

Aix-La-Chapelle se positionne comme un haut lieu de la recherche en fabrication additive en Allemagne. D'une part, car l'Université RWTH d'Aachen est le principal porteur de projets du programme « Cluster Photonik », soutenu à hauteur de 30 millions € par le BMBF (cf. supra). D'autre part, parce qu'il y existe le « Centre d'Aix-La-Chapelle pour l'Impression 3D », qui réunit notamment l'Institut Fraunhofer pour les techniques de laser (ILT), l'Université RWTH ainsi que l'Université de Sciences Appliquées (FH). Le centre organise chaque année un symposium sur le sujet, la « 3D Valley Conference » et a fait l'achat en juin 2017 [d'une des plus importantes infrastructures de laser du monde](#) pour 2 millions €.

II. c. Darmstadt (Esse)

Plusieurs centres de recherche importants sont localisés à Darmstadt, notamment au sein de l'Université Technique (TU) de Darmstadt : l'Institut pour l'Impression 3D et les Procédés (*Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren*, IDD) a pour objectif de rendre l'impression 3D mobilisable à échelle industrielle. La TU détient également un institut spécialisé dans la modélisation et la simulation 3D, l'Institut PTW, qui participe à plusieurs projets dans le cadre du programme ProMat_3D. Enfin, l'Institut Fraunhofer pour la durabilité structurelle et la fiabilité des systèmes (LBF) travaille également sur ce sujet.

II. d. Hambourg (Hambourg) et Potsdam (Brandebourg)

La signature d'un accord de coopération avec la société Fraunhofer le 26 janvier 2018, ainsi que l'approbation par le Sénat d'un investissement de 30 millions d'euros dans ces deux secteurs pour les cinq prochaines années, marque la volonté d'Hambourg de devenir un centre majeur dans ces domaines. Cet accord de coopération avec la société Fraunhofer crée un ensemble composé du centre de recherche Lazerzentrum Nord (LZN – Centre Laser Nord) et du Centrum für angewandte Nanotechnologien (CAN – Centre pour les Nanotechnologies Appliquées), auparavant rattachés à l'Université Technique de Hambourg. Ces deux centres seront réunis dans le nouvel Institut

Fraunhofer sous le nom d' « Institut pour les technologies de production additives » (IAPT – Institut für additive Produktionstechnologien), dont une partie est située à Potsdam.

Enfin, parmi les autres acteurs susceptibles de jouer un rôle dans la recherche en impression 3D, on peut citer notamment : le Centre allemand d'aéronautique et d'aérospatial (DLR), l'Institut pour la Technologie de Karlsruhe (KIT), et l'Université Technique de Munich (TUM) (en partenariat avec le centre de R&D d'Airbus EADS à Munich). Airbus Hambourg poursuit également une activité de R&D importante sur le volet des [applications industrielles](#) de l'impression 3D.

III. Recherche par domaines d'application

III. a. Environnement

La recherche sur les utilisations à caractère environnemental de l'impression 3D n'est que très peu développée en Allemagne. Les études¹ se concentrent davantage sur l'implication environnementale « intrinsèque » de cette technologie (utilisation des matériaux, durée de vie des produits et conséquences sur la production de déchets etc.).

La « bionique » est cependant un domaine dans lequel l'utilisation de l'impression 3D est globalement assez étudiée Outre-Rhin. Ainsi, l'institut pour le design informatique (ICD) de l'Université de Stuttgart a expérimenté l'impression d'une membrane (« HygroSkin »), dans le domaine architectural, capable de réagir instantanément à l'humidité d'un milieu et offrant ainsi des perspectives intéressantes en termes de régulation thermique et d'économies d'énergies d'un bâtiment.²

Certains industriels ont également franchi le pas de l'impression 3D, dans l'objectif d'alléger des composants et ainsi s'engager dans une démarche environnementale, à l'image d'Airbus, qui en 2015 a annoncé avoir imprimé le plus grand composant de cabine d'avion, une cloison pour l'Airbus A320, en 3D. Qualifiée là-aussi de bionique en raison de sa conception basée sur le modèle de la structure cellulaire et le développement osseux, la cloison était 45% plus légère que les modèles actuels soit 30 kg en moins. De la même manière, dans l'automobile, BMW imprime, dans leur centre de R&D de Munich (et dans la Silicon Valley) en 3D des prototypes de pièces métalliques pour ses voitures.

III. b. Médecine

Quelques exemples de projets de recherche dans le domaine médical par fabrication additive : Dans le cadre du programme ProMat_3D, deux projets de recherche en médecine sont soutenus par le BMBF :

- Le projet « Technologie hybride multi-matériaux pour la fabrication additive en dentaire (MYTHOS). Durée : 2017-2019. Montant : 2.5 millions €
- Le projet « Production générative d'implants avec structures hybrides pour la zone du crâne (HY2PRINT) ». Durée : 2017-2020. Montant : 2 millions €.

¹ cf. notamment Etude de l'Öko-Institut «3D Printing – Risks and Opportunities », 5 décembre 2013

² <https://www.detail.de/artikel/klimaregulierung-aus-dem-3d-drucker-25787/>

Des chercheurs allemands de l'Institut de technologie de Karlsruhe (KIT) ont développé en décembre 2017 un cube spécial à l'aide de l'impression 3D, qui permet de convertir indépendamment des mouvements linéaires en appliquant une pression dans un mouvement de rotation. Les domaines d'application sont les nouveaux types d'amortisseurs et de prothèses.

Des chercheurs de l'hôpital de la Charité à Berlin ont développé des prothèses en fibre de titane imprimées en 3D permettant de soutenir la régénération des os après un traumatisme, une infection ou un cancer (janvier 2018).

L'Institut pour les bio-procédés et les techniques d'analyse (IBA) de Thuringe a annoncé le début de deux projets de recherche entre 2017 et 2020 sur l'impression 3D de bio-tissus, pour un montant total de 900 000€.

Partie II. Dimension industrielle : Acteurs et branches de l'impression 3D

I. Forces et faiblesses des entreprises allemandes dans l'industrie de fabrication additive

I. a. Une croissance du marché soutenue

Le marché de la fabrication additive (FA) connaît une croissance rapide qui a tendance à s'accélérer au cours des dernières années. Selon l'estimation des experts EFI³ en 2015⁴, environ 1 000 entreprises allemandes fournissent des biens de FA⁵, dont environ 90% des PME répondant à la norme de la commission européenne⁶. Environ 160 des entreprises identifiées développent et produisent du matériel, et environ 240 entreprises des logiciels pertinents pour la FA. Les entreprises restantes offrent soit exclusivement des prestations de services ou des services en combinaison avec du matériel et des logiciels. Pour les entreprises allemandes, la part des ventes mondiales⁷ pour 2010 a été estimée entre 15 et 20%, ce qui correspond à un chiffre d'affaires d'environ 260 millions de dollars. Les prévisions concernant la croissance du marché mondial de la fabrication additive à l'horizon 2020 varient selon les sources et oscillent entre 7,1 et 21,2 milliards de dollars.

I. b. Disparité entre une forte offre du côté des fournisseurs et fabricant et une faible utilisation dans la pratique industrielle.

Alors que certaines des plus importantes sociétés de développement et de fabrication dans le domaine des procédures, des matériaux et des installations de production de FA sont basées en Allemagne, en particulier pour les procédés à base de métal⁸ (par exemple *EOS GmbH*, *SLM Solutions Group AG*, *Concept Laser GmbH*, *Realizer GmbH* dans le domaine du frittage sélectif et la fusion sélective par laser; et *Voxeljet AG* dans le domaine du *Binder Jetting*), le nombre d'utilisateurs industriels est actuellement limité à un nombre relativement restreint de grandes entreprises (*Siemens AG*, *MTU Aero Engines AG*, *Airbus SE*, constructeurs automobiles, etc.) et PME dans un cercle plutôt étroit de l'industrie en comparaison avec les États-Unis. L'élargissement de la base d'utilisateurs industriels allemands de ce nouveau procédé de fabrication est donc un défi majeur pour les années à venir. On note également le réseau « *3D Netzwerktreffen* » et la fédération « *Verband 3DDruck e.V* »⁹, tous deux lieux de rencontres intersectorielles des entreprises, favorisant les échanges. La fédération est également chargée de représenter les acteurs du secteur auprès des acteurs publics, politiques ou médiatiques.

Le nombre de publications scientifiques et de brevets déposés venant d'Allemagne connaît une forte hausse (voir annexe 2).

³ La commission d'experts pour la recherche et l'innovation soumet chaque année un rapport au gouvernement fédéral.

⁴ https://www.e-fi.de/fileadmin/Gutachten_2015/EFI_Gutachten_2015.pdf

⁵ Les biens de FA comprennent : les imprimantes, matériaux, accessoires et logiciels ainsi que les services FA, utilisés pour la production. Les produits finis de FA ne sont pas inclus.

⁶ <https://www.iit-berlin.de/de/publikationen/additive-fertigungsmethoden>

⁷ Un chiffre global de 1,5 md d'euros prenant en compte les biens et services FA.

⁸ En revanche, les États-Unis sont leaders en équipements permettant la transformation de thermoplastiques.

⁹ Récemment créé en 2016.

I. c. Causes des réticences des PME utilisatrices face à la technologie de FA

Les entreprises du *Mittelstand* allemand (PME), qui constituent l'essentiel du tissu économique allemand, n'utilisent pas encore ou très peu les procédés de fabrication industrielle. Cette réticence des PME est notamment due au capital humain et aux moyens financiers limités constituant différents défis : (i) les risques et les incertitudes élevés des investissements dans les procédés de FA (procédés techniques non matures manquant encore de normes et de standards) (ii) le manque d'informations et de moyens d'expérimentation pratiques concernant l'identification du potentiel d'application, de nouveaux modèles d'entreprises; et (iii) des possibilités de compétences insuffisantes (manque de compétences et qualifications des employés).

II. *Statu quo* et perspectives de développement de la FA à usage industriel et personnel

II. a. Champ d'application actuel

En Allemagne, les applications de la FA dans le prototypage rapide (*Rapid Prototyping*) et l'outillage rapide (*Rapid Tooling*), sont largement établis depuis plus de 25 ans. Le développement de la fabrication rapide (*Rapid Manufacturing*) est en phase d'émergence. Une diffusion à grande échelle n'est pas prévue dans les 10 prochaines années, estiment les experts du bureau d'évaluation des répercussions technologiques au Bundestag allemand¹⁰ (*TAB*)¹¹. À l'heure actuelle, l'utilisation de procédés de fabrication additive dans la production se limite principalement à la production de prototypes, de composants complexes en pièces uniques ou en petites séries. En Allemagne, il s'agit principalement de l'industrie aérospatiale (production de composants légers), de l'industrie automobile (sur mesure) et de la technique médicale (prothèses dentaires, oreillettes pour appareils auditifs, implants personnalisés). Des verrous technologiques subsistent, qui entravent l'utilisation systématique des procédés de fabrication additive dans la production industrielle, en particulier dans les grandes séries.

La FA à usage personnel¹² est très peu répandue. Jusqu'à présent, elle est plutôt utilisée pour les activités de prototypage et d'expérimentation par un groupe hétérogène d'utilisateurs de technologies avancées, le mouvement des *makers*. L'émergence de *Makerspaces* ou de *FabLabs* est associée à l'avènement de ce mouvement. Le premier *FabLab* en Allemagne a été créé en 2009 par l'université technique RWTH Aachen. Ces ateliers en question existent actuellement dans chaque grande ville allemande¹³, principalement gérés par des municipalités ou en coopération avec des universités.

II. b. Perspectives à moyen et long terme

Les experts du *TAB* supposent qu'en raison de l'important lien des processus traditionnels en Allemagne, les procédés hybrides, c'est-à-dire les combinaisons de procédés conventionnels et

¹⁰ Parlement fédéral.

¹¹ Rapport du bureau *TAB*, publié en 2017: <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab175.pdf>

¹² La fabrication dite « personnelle » représente les usages grand public de l'impression 3D.

¹³ Le recensement exact du nombre de « FabLabs » allemands n'est pas possible aujourd'hui.

additifs, **vont se répandre dans les cinq à dix prochaines années pour constituer un nouveau savoir-faire** dans le domaine de la fabrication additive. Actuellement, les acteurs allemands progressent par étapes. Le développement de produits et de modèles commerciaux innovants, et donc la valorisation des potentiels disruptifs de la fabrication additive, n'est pas encore réellement ciblé.

Concernant l'usage grand public de l'impression 3D, la notoriété des « FabLabs » est en hausse régulière, contribuant ainsi à la diffusion de la technologie dans la sphère privée. Cependant, les experts du TAB ne peuvent estimer si l'accroissement de la commercialisation (nouveaux concepts de modèles tels que les plateformes numériques, proposant des utilisations numériques téléchargeable contre paiement, etc.) continuera constamment à évoluer, ou s'il s'agit d'un phénomène de mode passager.

Cas d'expérimentation industrielle : Relocalisation des activités de production d'Adidas¹⁴

Adidas AG a lancé en été 2017, en coopération avec Oechsler AG, la production en série de chaussures de sport « Speedfactory » à Ansbach en Allemagne, intégrant partiellement une technologie d'impression 3D. L'expérimentation consiste à la production de semelles d'impression 3D spécialement conçues pour le consommateur. Le client court sur un tapis roulant et la semelle personnalisée est imprimée dans une autre pièce. À moyen terme, une production annuelle, largement automatisées, de 500 000 paires de chaussures, est envisagée. En comparaison, en 2016, le groupe a produit 360 millions de paires de chaussures selon les chiffres actuels, dont 97% en Asie. L'objectif est d'une part, en termes de gestion de la chaîne logistique de réduire le temps de transport et de limiter les stocks et la surproduction, et d'autre part, en termes de consommateur de répondre au besoin de personnalisation et de rapidité/flexibilité. En effet, au lieu de prendre 18 mois pour le lancement d'un modèle, la production locale prendrait, selon Adidas, seulement quelques heures.

III. Dimension réglementaire

III. a. Cadre légal et nouveaux défis réglementaires de la fabrication additive

III. a. 1. Une situation juridiquement inconnue, entraînant des besoins de clarification

Les questions juridiques concernent en particulier la protection de la propriété intellectuelle (protection des modèles numériques 3D, protection contre l'imitation de produits existants), la sécurité des produits, ainsi que le droit de responsabilité (constellations d'acteurs complexes en raison de différentes personnes impliquées dans le processus de développement de produits en grande partie virtuel). Le caractère nouveau de cette technologie entraîne potentiellement un manque de clarté juridique : il n'y a pas de jurisprudence dans le domaine. Selon la doctrine majoritaire, les normes existantes (propriété intellectuelle notamment) seraient néanmoins suffisantes pour assurer la clarté juridique. Néanmoins, des incertitudes demeurent : fabrication d'armes par impression 3D, nouveaux standards réglementaires pour la fabrication de pièces via ce procédé, modélisation numérique par Open Source... Ces incertitudes reflètent celles qui existent dans l'Union Européenne.

¹⁴ <http://www.wiwo.de/unternehmen/handel/adidas-speedfactory-individualisierung-stellt-adidas-vor-grosse-herausforderungen/20211984.html>

III. a. 2. Sécurité des produits et responsabilité des personnes privées comme défi à venir

Les défis dans l'application des règlements existants résultent en particulier de la disponibilité d'équipements abordables de fabrication additive. Les particuliers fournissant des modèles numériques pour ce type d'industrie ou de propre conception d'objets en FA contre rémunération, ne sont qu'insuffisamment familiarisés avec les réglementations en vigueur pour la sécurité et l'entretien des produits, ou ne sont souvent pas en mesure de s'acquitter de leurs obligations. Les experts du *TAB* estiment que la nécessité de renforcer la protection des consommateurs concernant ces produits pourrait s'avérer, le cas échéant, nécessaire. Une mesure possible serait d'établir une obligation de marquage CE pour les produits provenant de la fabrication additive privée.

Annexe 1 : Liste des principaux acteurs allemands

Nom de l'acteur	Ville/ Land	Domaine	Page du site
EOS Electro Optical Systems GmbH	Krailling, Bavière	Fabricant de machines spécialisé dans la technologie dites de frittage/ fusion sélectif par laser	https://www.eos.info/en
SLM Solutions GmbH	Lübeck, Schleswig- Holstein	Fabricant de machines spécialisé dans la technologie dites de fusion sélective par laser	https://slm-solutions.com
Voxeljet AG	Friedberg, Hesse	Fabricant de procédés <i>binder Jetting</i>	https://www.voxeljet.com/de/
Concept Laser GmbH	Lichtenfels, Bavière	Fabricant de machines spécialisé dans la technologie dites de fusion sélective par laser	https://www.concept-laser.de/home.html
Envisiontec GmbH	Gladbeck, Rhénanie- du-Nord- Westphalie	Fabricant de machines spécialisé dans diverses technologies	https://envisiontec.com
Realizer GmbH	Borchen, Rhénanie- du- Nord- Westphalie	Fabricant de machines spécialisé dans la technologie dites de fusion sélective par laser	http://www.realizer.com/en/
Trumpf AG	Stuttgart, Bade- Wurtemberg	Fabricant de machines spécialisé dans la technologie dites de fusion sélective par laser	https://www.trumpf.com/fr_INT/
Siemens AG	Munich, Bavière	Utilisation industrielle- Fabrication additive de pièces de rechange pour turbines à gaz industrielles	https://www.energy.siemens.com/hq/en/services/industrial-applications/additive-manufacturing.htm

MTU Aero Engines	Munich, Bavière	Utilisation industrielle- Fabrication additive de composants en série pour la construction de moteurs	http://www.mtu.de/technologies/manufacturing-processes/additive-manufacturing/
Airbus SE	Finkenwerde , Hambourg (siège allemand)	Utilisation industrielle- Fabrication additive en série de pièces titane	http://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2017/09/first-titanium-3d-printed-part-installed-into-serial-production-.html
Verband 3DDruck e.V.	Berlin, Berlin	Représentation en tant que régulateur à l'encontre de la politique, la société et les médias	http://www.verband3ddruck.berlin/
Bitkom e.V.	Berlin, Berlin	Fédération allemande du numérique qui a publié sa prise de position sur l'impression 3D en février 2017	https://www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Bitkom-Positionspapier-3D-Druck.html

Annexe 2: Les 30 premiers déposants de brevets dans le domaine de la fabrication additive (2003-2012)

classés par pays, nom, type d'acteur¹⁵, part de brevet en % - Source: Fraunhofer ISI, 2016

Tab. IV.2 Die 30 führenden Patentanmelder im Bereich der additiven Fertigung (2003–2012)

Anmelderland	Anmelder	Typ	Patentanteil in %
DE	EOS Electro Optical Systems	KMU	3,4
DE	Evonik Degussa	GU	2,7
US	3D Systems	GU	3,2
DE	MTU Aero Engines	GU	2,5
US	Hewlett Packard Development Company	GU	2,4
DE	Siemens	GU	2,1
NL	TNO	FuE	1,9
US	Stratasys	GU	1,7
DE	Fraunhofer	FuE	1,4
DE	Voxeljet AG	KMU	1,4
IL	Objet Geometries	KMU	1,2
NL	DSM IP Assets	GU	1,1
US	The Boeing Company	GU	1,1
US	General Electric Company	GU	1,0
SE	ARCAM	KMU	0,9
US	Nike International	GU	0,9
GB	BAE Systems	GU	0,8
JP	Panasonic Electric Works Company	GU	0,8
IT	DWS	KMU	0,8
US	E.I. Du Pont de Nemours & Company	GU	0,7
US	Eastman Kodak Company	GU	0,7
CH	Michelin Recherche et Technique	GU	0,7
JP	Mimaki Engineering Company	GU	0,7
US	Z Corporation (heute 3D Sytems)	GU	0,7
DE	EADS Deutschland	GU	0,6
JP	Fujifilm Corporation	GU	0,6
DE	BEGO Medical	KMU	0,6
DE	EnvisionTEC	KMU	0,6
LI	Ivoclar Vivadent	GU	0,6
US	Pratt & Whitney Rocketdyne	GU	0,6
FR	SNECMA	GU	0,6
US	United Technologies Corporation	GU	0,6
gesamt			39,6

FuE: Forschung und Entwicklung, GU: Großunternehmen

Quelle: Fraunhofer ISI 2016, S. 87

¹⁵ FuE = R&D; KMU= PME; GU= grande entreprise

Références & liens utiles

C. Caviezel, R. Grünwald, S. Ehrenberg-Silies, S. Kind, T. Jetzke, M. Bovenschulte, TAB beim Bundestag, Innovationsanalyse, *Additive Fertigungsverfahren (3D-Druck)*, 2017

<https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab175.pdf>

Bitkom Positionspapier, *3D Druck – Erfolgsgeschichte für den Digitalstandort*, 2017

<https://www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Bitkom-Positionspapier-3D-Druck.html>

Leopoldina, Acatech, Union der deutschen Akademie der Wissenschaften, *Additive Fertigung*, 2016

https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2016_Stellungnahme_AdditiveFertigung.pdf

BMBF, „*Deutschland druckt drei dimensional*“, 2017

https://www.bmbf.de/pub/Deutschland_druckt_dreidimensional_Additive_Fertigung.pdf

New-Delhi, le 19 février 2018

Réponse au courrier de Monsieur Cédric Villani, Député de l'Essonne et premier vice-président de l'OPECS

Objet : Impression 3D : situation – non exhaustive – en Inde

Résumé : Survol non exhaustif du paysage indien de la fabrication additive (impression 3D).

Une étude réalisée au profit de la Délégation aux Affaires Stratégiques du Ministère de la Défense, publiée en avril 2014, et orientée plutôt sur la dimension duale, montre que l'impression 3D est à un stade naissant en Inde. L'Inde ne détient alors que 3% des machines existantes en Asie. Il s'agit essentiellement de systèmes qui fabriquent des pièces plastiques. En 2014, le positionnement technologique indien se caractérise par une absence de maîtrise sur certaines techniques d'impression additives ayant des applications potentielles stratégiques (armement), ou limitées, dans d'autres domaines (application aérospatiale).

Toutefois, depuis 2014, le paysage indien a évidemment évolué comme indiqué par les exemples mentionnés ci-dessous :

Quelques entreprises comme *Imaginarium*, *Marcopolo Products Ltd* et *3DPD/Total Prototyping* pour n'en nommer que quelques-unes, jouent un rôle de précurseurs en intégrant dans leurs processus de fabrication de prototype des imprimantes 3D de conceptions étrangères.

Le secteur dans lequel l'impression 3D trouve une place de choix en Inde est celui de l'automobile. L'impression 3D est utilisée non pas dans la fabrication, mais comme un outil intervenant dans la gestion de projet.

La société *Ikis*, qui propose des services de modélisation architecturale, utilise l'impression 3D depuis 2010 pour fournir à la demande des modèles 3D de bâtiments à toutes les étapes de leur construction en utilisant la technologie mise au point par la société américaine *Z Corporation*.

Un autre exemple est la société *Wipro Technologies* (wiproinfra.com), une SSII indienne créée en 1980, dont le siège se situe à Bangalore. Cette entreprise propose ses compétences en mécanique de précision et en fabrication de composants hydrauliques au secteur de la défense. Elle a signé un accord de transfert de technologie (FdF) avec CESA, une filiale d'Airbus Group (EADS). Cette entreprise utilise le potentiel de l'impression 3D pour les industries pétrolières et gazières, notamment pour la réalisation de pièces en titane. *Wipro technologies* aide ses clients à réfléchir à l'intégration de l'impression 3D dans la chaîne d'approvisionnement.

Le gouvernement ne semble pas avoir décidé de soutenir spécifiquement le développement de l'impression 3D. A ce jour aucune déclaration publique ni initiative gouvernementale n'a été identifiée.

Les principales actions en faveur de l'impression 3D proviennent du secteur privé. Ainsi, l'association de l'industrie *Additive Manufacturing Society of India* (AMSI), favorise l'émergence des technologies les plus récentes et organise des conférences pour sensibiliser les industriels.

En matière de formation, on constate qu'il y a un lien fort entre la recherche publique et les besoins industriels. Ainsi, de nombreuses recherches sont en cours dans divers Instituts Indiens de Technologies (IIT). Actuellement, cette demande émerge principalement dans les secteurs de la santé, de la joaillerie et de l'automobile. Par ailleurs, les logiciels de CAO qui sont largement utilisés en Inde y sont aussi développés.

D'autres établissements tels que par exemple l'Institut National de Technologie de la Mode (NIFT Delhi) ont introduit dans leurs programmes d'enseignement la conception par imprimante 3D.

On notera l'initiative intéressante lancée par l'Université Veltech (Chennai) fin 2016 en partenariat avec une filiale locale du fabricant américain MakerBot. Il s'agit d'un programme de formation destiné aux enseignants de plus de 800 établissements dans tout le pays, en partenariat avec les gouvernements locaux, afin d'améliorer les compétences des enseignants en matière de techniques de fabrication additive, en introduisant des programmes basés sur l'enseignement par projet, le *design thinking* et la créativité.

Coopérations nationales et internationales en Inde

C'est avec les États-Unis et la France que l'Inde semble collaborer le plus sur ce sujet.

On notera par exemple l'intervention à venir (avril 2018), dans le cadre du programme GIAN, d'un professeur de Centrale Nantes, M. Surendar K. Marya, au National Institute of Warangal sur le sujet « *Hybrid Additive Manufacturing Viewed from Materials Science: Fundamentals and State of the Art.* »

Utilisation domestique : si l'implantation des fablabs en Inde se développe lentement, on peut toutefois noter des initiatives portées par des gouvernements locaux tels que « Kerala Start Up Mission » qui a lancé en janvier 2017 un programme visant à ouvrir 70 fablabs dans des *colleges of engineering* affiliés à *Abdul Kalam Technological University*.

A Bombay, le Maker's Asylum, un fablab bien connu de nos services, met à la disposition de ses membres plusieurs imprimantes 3D grâce à son partenariat avec l'entreprise voisine *Imaginarium*, l'un des leaders indiens dans le domaine du prototypage et de la fabrication rapide.

Rédactrice : Sandrine Maximilien, attachée de coopération scientifique et universitaire

Fabrication additive ou impression 3D aux Pays-Bas

En réponse à la demande de l'OPECST du 21 décembre, cette note s'applique à présenter i) le contexte néerlandais dans lequel le développement de l'impression 3D s'inscrit, ii) puis une cartographie des principaux acteurs néerlandais de la fabrication additive, iii) ainsi que des enseignements tirés de la situation néerlandaise pour le cas français.

La fabrication additive, plus connue sous le nom « d'impression 3D », est ici prise au sens large des possibilités offertes par ce procédé, allant du prototypage rapide en passant par l'outillage rapide, la fabrication directe de pièces fonctionnelles jusqu'à la fabrication domestique, par exemple du type d'objets à domicile¹. Cette technique est apparue dans les années 1980 aux Pays-Bas, comme ailleurs en Europe, d'abord pour le prototypage. Elle s'est rapidement étendue, en particulier dans le cadre du développement de l'« usine du futur ». Dorénavant, elle est utilisée dans de nombreux domaines industriels (automobile, aérospatial, biomédical, construction, défense par exemple). A titre d'exemple, les Pays-Bas ont mis sur le marché à partir de 2016 la première imprimante 3D entièrement néerlandaise : **MetalFAB1**. Responsable de sa conception, l'entreprise **Additive Industries** d'Eindhoven en avait vendu, à date de mars 2017, quatre modèles (1,3 M€ pièce).

L'impression 3D s'est particulièrement développée aux Pays-Bas. Le chiffre d'affaires des activités associées à la fabrication additive a presque triplé en 3 ans², passant de **45 M€ en 2015 à 100 M€³ en 2016 et 120 M€ en 2017⁴**. Sur le plan macroéconomique, le poids de la « 3D » reste cependant marginal (moins de 0,1% du PIB).

1. Le développement de l'impression 3D participe à la stratégie de soutien à l'innovation des autorités néerlandaises, en lien avec les centres de recherche.

Faire figurer les Pays-Bas parmi les cinq pays les plus performants au monde en termes de recherche et d'innovation constitue une ambition affichée du gouvernement néerlandais, dans l'objectif de renforcer la compétitivité de l'économie et d'accompagner les transformations industrielles. Dans cette perspective, les Pays-Bas cherchent à appliquer le plus largement possible le modèle de la « triple hélice », autour des trois piliers formés par le gouvernement, les entreprises et les universités. Ce modèle permet également à l'Etat néerlandais de chercher à s'appuyer autant que possible sur des financements privés. Ainsi, **les Pays-Bas ont un système de recherche et d'innovation caractérisé par une forte collaboration entre le gouvernement, les institutions du savoir et les entreprises**. Cette stratégie s'incarne notamment dans la politique des « secteurs de pointe » (*topsectoren*), organisée autour de neuf domaines d'excellence pour la période 2016-2019⁵. **L'impression 3D fait partie du secteur de pointe dit « des systèmes et matériels haute technologie⁶ ».**

1.1. Dans la perspective de la théorie de la triple hélice, **les universités et écoles néerlandaises sont également responsables de la formation** de la main d'œuvre pour les entreprises. Les enjeux en matière d'enseignement supérieur sont cruciaux pour la

¹http://www.centre.cci.fr/sites/centre.cci.fr/files/L%27impression%203D_etat%20des%20lieux%20et%20perspectives.pdf

² Voir Annexe 1

³ Annexe 1 : Chaîne de valeur de l'impression 3D aux Pays-Bas en 2016

⁴ <https://insights.abnamro.nl/2017/03/omzet-3d-printing-in-nederland-naar-120-miljoen-in-2017/>

⁵ Les neuf secteurs de pointe sont : chimie, industries créatives, énergies, systèmes et matériels haute technologie, logistique, sciences de la vie, matières premières, eau et agriculture et alimentation

⁶ <https://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/high-tech-materialen-topsector-htsm>

croissance du secteur de l'impression 3D. L'impression 3D est ainsi prise en compte dans le système éducatif de la manière suivante.

- **Les formations de niveau MBO** (Middelbaar beroepsonderwijs – enseignement secondaire professionnel) **visent à former des techniciens** capables d'intégrer la fabrication additive dans leurs compétences. Les lycées ne proposent pas de cursus MBO dédié à l'impression 3D mais intègrent la plupart du temps ces questions dans des parcours plus larges. Par exemple, le lycée Vinci College dispose d'une « usine durable » (duurzaamheidsfabriek) au sein de laquelle les élèves peuvent se familiariser avec l'impression 3D⁷.
- **Les universités des sciences appliquées** (hogescholen – enseignement supérieur professionnel) **forment des techniciens supérieurs** (*industrial designers* par exemple) qui doivent être capables d'utiliser les méthodes de la fabrication additive. Ainsi certaines hogescholen (Fontys Hogeschool⁸, Avans Hogeschool⁹...) proposent des **formations en mécatronique** formant aux compétences spécifiques nécessaires pour travailler dans le domaine de l'impression 3D (informatique, électronique, automatique...), d'autres proposent des **modules dédiés à la fabrication additive** intégrés dans d'autres parcours (par exemple HAN Hogeschool¹⁰). Parfois, les hogescholen proposent également des **associate degrees sur l'impression 3D**¹¹, parcours en deux ans destinés aux élèves MBO comme passerelle vers les universités des sciences appliquées.
- **Les universités de technologie forment quant à elles des ingénieurs** qui doivent être capables d'utiliser l'impression 3D. La plupart du temps, il ne s'agit pas de cursus spécifiques mais de modules intégrés dans d'autres parcours de spécialisation (*design engineering* par exemple). Les universités ont également investi dans des **laboratoires d'impression 3D ouverts à tous les étudiants, encourageant une approche transversale** croisant la fabrication additive et les spécialités des étudiants. C'est notamment le cas de l'Université de Twente qui dispose d'un Rapid Prototyping Lab depuis 2017, accessible à toutes les unités de recherche et à tous les étudiants.

1.2. Le transfert de technologies vers les entreprises est un enjeu important de la triple hélice. Aux Pays-Bas, **TNO** (l'organisme néerlandais pour la recherche scientifique appliquée) joue un rôle central, en particulier dans le domaine de l'impression 3D, en se plaçant **à l'interface entre les centres de recherche et les entreprises**. TNO dispose par exemple du « Rapid Manufacturing Demo Centre », centre de soutien aux entreprises pour l'impression 3D, et de matériel d'impression 3D (sous basse et haute température - MetalPrint/GoldPrint, Pyrome Printer).

TNO a également signé avec le High Tech Systems Center, qui dépend de l'Université de technologie d'Eindhoven, un accord, en 2016, portant sur la création d'un centre national de recherche dédié à l'impression 3D, le centre **AMSYSTEMS**.

Cette alliance a pour but de faire de ce nouveau centre un leader européen de l'innovation dans l'impression 3D afin de développer de nouvelles applications, notamment dans les domaines de l'électronique mais aussi du médical en visant principalement la production

⁷ <https://www.davinci.nl/duurzaamheidsfabriek>

⁸ <https://fontys.nl/Studeren/Opleidingen/Mechatronica-voltijd/Eindhoven-1.htm>

⁹ <http://www.avans.nl/opleidingen/opleidingzoekers/mechatronica-breda-voltijd-bachelor/introductie>

¹⁰ <https://www.han.nl/werken-en-leren/studiekeuze/cursus/3d-printen/>

¹¹ <https://www.duurzaamheidsfabriek.nl/ad-traject-levert-duurzame-concepten-op/>

d'objets personnalisés, intelligents et multifonctionnels. **Les programmes de recherche d'AMSYSTEMS** se concentrent principalement sur la fabrication additive et hybride multi-matériaux pour quatre domaines d'applications : l'électronique, la haute technologie, les applications médicales et dentaires et l'alimentation.

Créée dans le cadre d'AMSYSTEMS, **Fieldlab MultiMaterial 3D Printing** est une **plateforme de co-création de la recherche**, au sein de laquelle des parties prenantes de la chaîne de valeur peuvent se concerter afin de développer les solutions technologiques et matérielles futures. La plateforme, rassemble plus de 30 partenaires, dont des universités (TU/Eindhoven, Fontys Hogeschool), des centres de recherche (ECN, TNO), des clusters (Brightlands Materials Center) et des entreprises (Philips, Siemens, Thales...). Le Fieldlab fait par ailleurs partie du *Smart Industry Action Agenda* engagé sous le patronage du ministère de l'économie en 2015 afin de lancer l'industrie dans la 4^{ème} Révolution Industrielle.

2. Cartographie des acteurs de l'impression 3D aux Pays-Bas : un écosystème d'acteurs, caractérisé par de nombreux partenariats publics-privés à la gouvernance innovante

L'impression 3D permet non seulement de réduire drastiquement les coûts de production et de travail, mais également de promouvoir le « *direct manufacturing* », dans une approche de plus en plus personnalisée vis-à-vis du client.

2.1. Les Universités de technologie (au nombre de quatre aux Pays-Bas¹²) **sont les principales universités travaillant sur l'impression 3D, du point de vue des technologies nécessaires à la fabrication additive.**

Les principaux laboratoires de recherche des universités de technologie sont les suivants:

- **Le High Tech Systems Center de l'Université de technologie d'Eindhoven** travaille notamment sur le développement de nouveaux systèmes d'impression 3D pouvant utiliser plusieurs types de matériaux simultanément¹³.
- **Le Additive Manufacturing Lab de l'université de technologie de Delft** conduit des recherches sur la fabrication additive principalement sous l'angle du design informatique, c'est-à-dire sur la modélisation des objets numériques servant de base à l'impression.
- **Le Twente Center of Excellence in Additive Manufacturing (TEAM) de l'Université de Twente** est un centre de recherche interdisciplinaire qui s'intéresse principalement au développement des technologies de fabrication additive (traditionnellement l'Université de Twente se concentre sur les technologies de production).

2.2. D'autres universités et hogescholen (instituts des sciences appliquées), travaillent également sur l'impression 3D, principalement du point de vue des applications de cette technologie, notamment :

¹² Les 4 TU sont : Delft, Eindhoven, Twente, Wageningen

¹³ Cf annexe pour connaître les différents programmes de recherche

- **l'Université de Maastricht** conduit avec le Brightlands Materials Center, le chimiste DSM, TNO et la province du Limbourg, un des plus larges programmes de recherche en Europe dans le domaine des sciences biomédicales¹⁴ (étude des technologies pour la bio-impression d'organes par exemple) ;
- le **centre médical universitaire de l'université libre d'Amsterdam**¹⁵ a également développé un **3D Innovation Lab** permettant de conduire des recherches sur les applications médicales de l'impression 3D, en combinant l'expertise de médecins, de scientifiques, d'ingénieurs et de concepteurs. Le laboratoire travaille également sur l'impression 4D, notamment l'impression d'un œil artificiel pour les enfants qui pourrait évoluer au fil du temps¹⁶ ;
- **l'Université de Wageningen** travaille en coopération avec d'autres groupes de recherche (Brightland Material Center par exemple) sur les matériaux bio-sourcés pour l'impression 3D¹⁷.

2.3. Il existe, aux Pays-Bas, de nombreux **partenariats publics-privés (PPP), ainsi que des partenariats intergouvernementaux**. Dans le cas des PPP, les centres de recherche universitaires et des entreprises s'associent afin d'accélérer le déploiement de l'impression 3D à l'échelle nationale et d'en réduire les coûts (dans la mesure où les entreprises néerlandaises, pourtant favorables à l'impression 3D, jugent l'investissement dans une imprimante professionnelle souvent trop coûteux).

- Le **Brightlands Materials Center** est un partenariat entre l'Etat, des agences de l'Etat (TNO...) et des collectivités territoriales (province du Limbourg...), créé en 2015. Les recherches menées en son sein portent notamment sur l'amélioration de la qualité des produits issus de l'impression 3D (solidité, durabilité...), la fiabilité et la reproductibilité des mécanismes d'impression, le développement de nouveaux matériaux d'impression et de l'impression multi-matériaux, et l'augmentation de l'efficacité des processus de production ;
- **Innovatiecluster Drachten**¹⁸ a pour vocation de permettre la mise en commun des connaissances de compagnies high-tech en Hollande du Nord dans le cadre du développement de l'impression 3D. Il permet également à des centres de recherche universitaires (Universités de Groningue ou de Twente par exemple) de former des étudiants à l'utilisation de cette technologie et de développer des programmes d'études relatifs à cette dernière.

2.4. De nombreuses **entreprises néerlandaises** travaillent également dans le secteur de l'impression 3D.

Exemples d'entreprises néerlandaises utilisant la fabrication additive dans le domaine de la santé, de l'aéronautique et de la construction

¹⁴ <https://www.maastrichtuniversity.nl/news/um-and-brightlands-materials-center-start-largest-research-programme-3d-printing-biomedical>

¹⁵ <https://www.vumc.nl/afdelingen/3Dinnovationlab/>

¹⁶ <https://www.advalvas.vu.nl/nieuws/innovation-lab-vumc-wint-prijs-voor-3d-technieken>

¹⁷ <https://www.wur.nl/en/Research-Results/kennisonline/Soluble-Bio-based-Support-Structures.htm>

¹⁸ <https://www.icdrachten.nl>

Santé	Aéronautique/ Maritime	Construction
<ul style="list-style-type: none">• 3D Medical Solutions¹⁹• Z3D Labs²⁰	<ul style="list-style-type: none">• NLR²¹• 10 XL²²	<ul style="list-style-type: none">• MX3D²³• CYB Construction²⁴

Consciente des enjeux représentés par l'impression 3D, l'Agence Néerlandaise pour l'Entreprenariat (*Rijksdienst voor ondernemend Nederland ; RVO*) soutient les projets de développement de cette technologie en offrant des subventions pour les projets les plus innovants. A titre d'exemple, l'entreprise 10XL implantée à Dordrecht²⁵ a **reçu près de 150 000 € de subventions** de la part du RVO pour son développement axé vers le maritime en collaboration étroite avec le secteur de pointe « eau et maritime ».

3. Exemples de réalisations concrètes et pistes de réflexion tirées de l'exemple néerlandais

Les nombreuses collaborations entre acteurs privés et publics aux Pays-Bas ont par exemple permis les **réalisations** suivantes :

- **impression en 3D d'un pont en béton pour les cyclistes**²⁶ (première mondiale), en collaboration avec l'Université d'Eindhoven, AMSYSTEMS et Saint-Gobain
- **impression en 3D d'une maison à Amsterdam**²⁷, dans le cadre d'un projet d'une durée de trois ans « Research & Design by Doing » lancé par DUS Architecture²⁸, une équipe internationale composée d'architectes, de designers, d'informaticiens et d'experts de la fabrication additive
- **impression d'aliments**, par l'entreprise néerlandaise byFlow, spécialiste de l'impression 3D²⁹
- **impression 3D de pièces destinées aux hélicoptères NH-90**³⁰ pour le compte des Forces Aériennes Royales Néerlandaises en janvier 2017.

BFF (Better Future Factory) est actuellement **leader mondial pour l'emploi de matériaux recyclés**³¹ dans la fabrication de filaments à destination de l'impression 3D. Toutefois, d'autres entreprises néerlandaises se sont également placées sur le marché comme, par exemple, Dutch Filament ou Vink Kunststoffen. Le secteur de la fabrication additive aux Pays-Bas s'est développé rapidement depuis deux ans. Tant les points forts de ce secteur (coopérations public-privé, prise en compte de l'enjeu écologique...) que ses limites (formation...), constituent des pistes de réflexion intéressantes pour le cas français.

¹⁹ <http://www.3dms.nl/>

²⁰ <http://z3dlabs.com/>

²¹ <http://www.nlr.org/>

²² <https://10-xl.nl/>

²³ <http://mx3d.com/>

²⁴ <https://www.cybe.eu/>

²⁵ Données chiffrées issues d'une visite faite à l'entreprise le 26 janvier 2018

²⁶ <https://www.theguardian.com/technology/2017/oct/18/world-first-3d-printed-bridge-cyclists-netherlands>

²⁷ <http://3dprintcanalhouse.com/>

²⁸ <http://houseofdus.com/#section-manifesto>

²⁹ <https://3dfoodprintingconference.com/3d-food-printing-conference/first-3d-printing-restaurant-netherlands-coming-venlo/>

³⁰ <http://www.nlr.nl/nieuws/eerste-vlucht-commando-luchtstrijdkrachten-clsk-met-3d-geprint-onderdeel/>

³¹ <http://www.betterfuturefactory.com/>

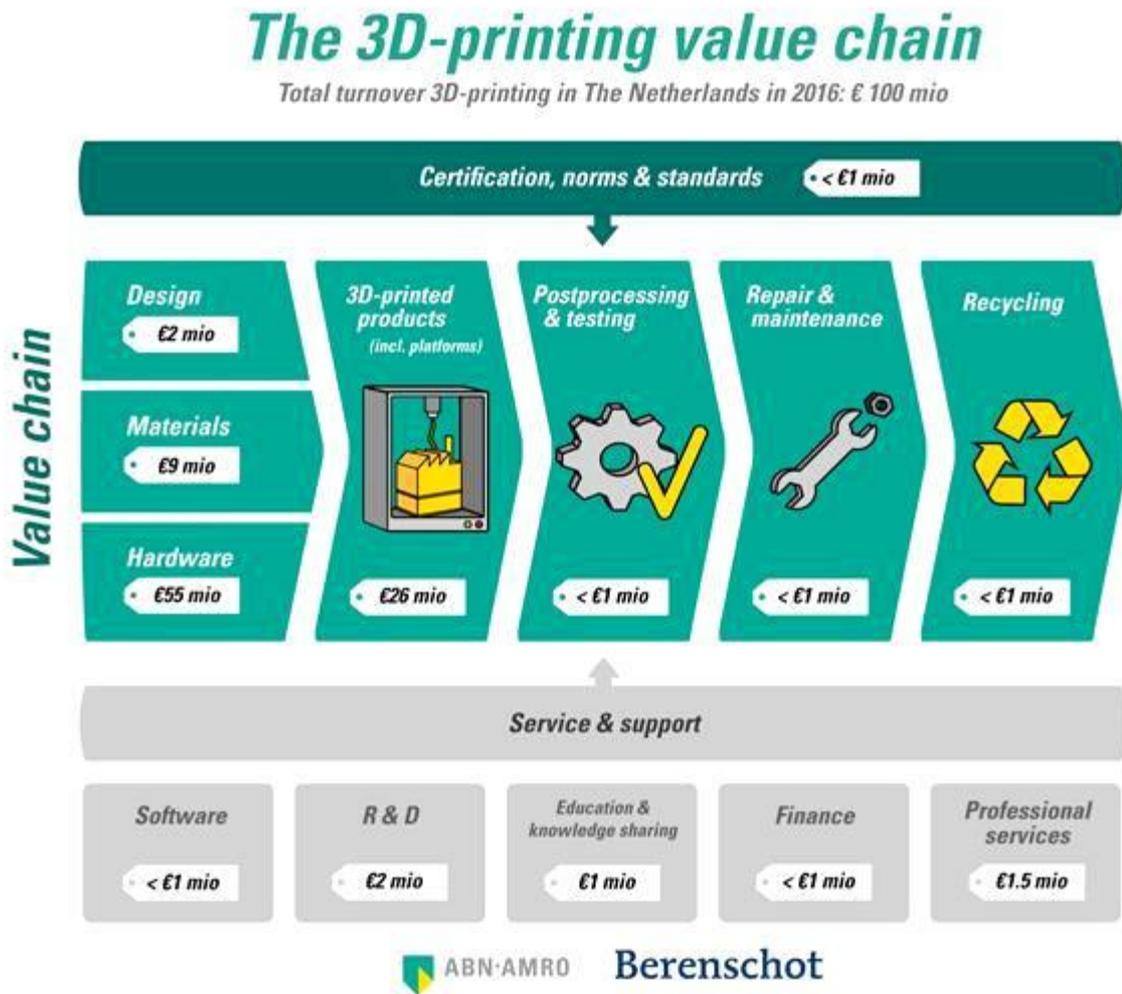
- Les **nombreuses collaborations entre acteurs publics et privés** de l'écosystème de recherche et d'innovation, et **l'implication du gouvernement** qui a priorisé des domaines d'excellence dans sa politique de soutien à l'innovation, en lien avec l'application la théorie de la « **triple hélice** », ont largement facilité l'émergence et le développement du secteur de la fabrication additive aux Pays-Bas
- **L'enjeu écologique** de l'impression 3D doit être pris en compte dès à présent, en privilégiant le développement de techniques et de matériaux s'inscrivant dans le cadre de l'économie circulaire. Le bas coût des filaments recyclés nécessaires à l'impression 3D pouvant être un argument supplémentaire (*entre 30 et 50€ par kilogramme de filaments*). **Dans la perspective de l'économie circulaire**, les Pays-Bas disposent actuellement d'une place de leader mondial pour ce qui a trait à l'emploi des filaments recyclés dans les imprimantes 3D. A ce titre, l'entreprise **BFF**, implantée à Rotterdam, fabrique des filaments à partir d'anciens claviers d'ordinateurs, du revêtement intérieur de frigidaires ou de bouteilles plastiques.
- **L'investissement dans la formation (enseignement secondaire et supérieur)** est nécessaire afin que les étudiants se familiarisent rapidement avec l'impression 3D et puissent l'intégrer dans de nouvelles techniques de développement et de conception de produits. Le transfert des résultats de la recherche vers l'enseignement est nécessaire, soit par le biais de modules transversaux à plusieurs disciplines (comme c'est majoritairement le cas actuellement aux Pays-Bas), soit par des programmes d'études dédiés. En effet, un rapport récent publié par la banque ABN Amro souligne que, malgré les initiatives existantes, un investissement croissant, notamment dans l'éducation, doit encore être réalisé afin de permettre aux Pays-Bas de conserver une avance technologique dans le domaine de la fabrication additive.

Un modèle spécifique de financement de la fabrication additive doit être défini et l'impact du développement de cette technologie sur les marchés de la logistique et du transport doit être anticipé. Si l'impression 3D recèle d'indéniables avantages en termes d'innovation, d'économie circulaire et environnementale, cette technologie représente également un véritable défi vis-à-vis du modèle économique exportateur des Pays-Bas, articulé autour des deux « points de transit principaux », appelés « mainports » (le port de Rotterdam et l'aéroport d'Amsterdam-Schiphol). En effet, selon un rapport du groupe ABN AMRO³² de mars 2017, la conséquence majeure de ce développement devrait être la réduction à hauteur de 25% du volume du commerce mondial. 50% des produits manufacturés à l'échelle mondiale seront produits grâce aux imprimantes 3D à partir de 2060.

Ces derniers doivent **adapter leurs méthodes de production mais également chercher de nouveaux clients** afin de rester compétitifs face à une technologie qui peut faciliter le *reshoring*, à travers le *direct manufacturing*, par ailleurs dans une logique d'innovation incrémentale entre centres de production et de recherche.

³² <https://www.ing.nl/zakelijk/kennis-over-de-economie/onze-economie/internationale-economie/3d-printing-a-threat-to-global-trade.html>

Annexe : La chaîne de valeur de l'impression 3D aux Pays-Bas en 2016



L'impression 3D au Royaume-Uni

Ce document est destiné à contribuer à la note préparée par l'OPECST sur l'impression 3D et/ou la fabrication additive. Il a été préparé par le service « Enseignement supérieur, recherche et innovation » de l'Ambassade de France à Londres. Il comporte trois volets : les acteurs, les résultats et les recommandations.

Rédacteur : Dr. Ludovic Drouin <ludovic.drouin@ambascience.co.uk>

— — —

Les acteurs

Le Royaume-Uni est un des leaders dans l'impression 3D notamment dans l'application pour la production de produit à haute valeur ajoutée dans le domaine de la médecine, l'aérospatial, et bien d'autres.

Les acteurs du secteur sont de toute évidence les universités et centres de recherche associés, on citera par exemple :

- le Manufacturing Technology Centre de Coventry (<http://www.the-mtc.org/>),
- le Warwick Manufacturing Group (<https://warwick.ac.uk/fac/sci/wmg>),
- l'Advanced Manufacturing Research Centre de Sheffield (<http://www.amrc.co.uk/>).

En parallèle à leur recherche, ces structures ont aussi une activité de formation, accès aux équipements spécialisés, de conseil (gouvernement et surtout PME), essai de ligne de production ou procédés de production, formation de réseau, et enfin d'interaction avec les différents acteurs satellites (financement, réglementation, politique publique...).

A la suite de recommandations, il a été récemment annoncé la création d'un réseau de *Digital Research Centre*, en ce qui concerne l'impression 3D les candidats potentiels sont : *Bournemouth University, University of Edinburgh, The University of Nottingham, The Manufacturing Technology Centre, The University of Sheffield, University of Loughborough, The University of Strathclyde*.

Au Royaume-Uni, l'impression 3D utilise surtout des polymères comme matière première, il y a un engouement certain pour l'impression 3D du titane pour une application évidente en médecine, mais pas uniquement. Par ailleurs nous pouvons noter l'arrivée de l'impression 3D céramique.

En 2017, il y a eu 833 dossiers de demande de financement déposés pour financer l'innovation dans cette thématique.

Les résultats

Le Rapport « Made Smarter »

2017

https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/655570/20171027_MadeSmarter_FINAL_DIGITAL.pdf

Le « poids » de l'impression 3D au Royaume-Uni est de 300 millions de livre sterling avec un parc humain de 35 000 employés, et un taux de croissance (CAGR) stable de 30%, cependant un sondage montre que seulement 17 % des entreprises britanniques ont eu ou ont recours à l'impression 3D contre 37% en Allemagne ou 24% en Chine. Il est donc clair que le Royaume-Uni est largement derrière les autres pays quant à l'application de la technologie dans le milieu industriel.

Le Royaume-Uni a de toute évidence identifié l'impression 3D comme étant une discipline clé pour la quatrième révolution industrielle, des prévisions estiment à 72,1 milliards de livre sterling le retour sur l'économie britannique. Il est estimé une réduction de coût passé sur le consommateur de 4,4 milliards de livre sterling avec une augmentation de la satisfaction du consommateur de 35%. Le bénéfice sur la société est visible avec une réduction de rejet de CO₂ de 12,6 million de tonnes en 2027 et une réduction de 7% des accidents du travail non mortels.

Un des résultats importants est de permettre à certaines régions du Royaume-Uni de retrouver un dynamisme économique par exemple les Midlands (secteur de Sheffield), mais aussi le Pays de Galles.

Les recommandations pour les perspectives à court, moyen et long terme

Mapping UK Research and Innovation in Additive manufacturing

Février 2016

https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/505246/CO307_Mapping_UK_Accessible.pdf

Les principales recommandations sont les suivantes :

1. Une stratégie nationale pour développer l'industrie de l'impression 3D britannique est essentielle pour faire face à l'augmentation du nombre et de la diversité des compétences des acteurs de l'écosystème de l'impression 3D, mais aussi conseiller sur la direction des objectifs en matière de recherche.
2. Un réseau des utilisateurs et des développeurs de cette industrie devrait être créé pour établir une cohésion entre les acteurs britanniques en matière de recherche, pour faciliter le transfert de connaissance et pour agir en tant que point focal pour cette industrie au Royaume-Uni.

3. Quand approprié, les utilisateurs de cette technologie (procédés, matières premières, et création de systèmes) doivent être impliqués le plus tôt possible dans la phase de recherche fondamentale.
4. Une augmentation de la formation dans le domaine doit être aussi mise en place.

Additive Manufacturing UK-National Strategy 2018 – Leading Additive Manufacturing in the UK

Novembre 2017

http://am-uk.org/wp-content/uploads/2017/11/AM-UK_Strategy_Publication_Amends_Novermber_Digital.pdf

Les recommandations générales concernent :

1. La nécessité d'une campagne forte de communication auprès des entreprises sur les opportunités et le potentiel de l'impression 3D.
2. Le développement de l'impression 3D va de pair avec la digitalisation de l'industrie ; d'où la nécessité d'avoir un lien opérationnel fort entre l'impression 3D et le financement de la digitalisation de l'industrie et la politique industrielle.

Plus spécifiquement par secteur.

Design

1. Commissionner une étude pour établir la politique de bonne pratique et établir les accréditations dans la discipline. L'étude devra être rendu publique par le biais d'un portail interactif développé et maintenu par des institutions d'ingénieurs professionnels.
2. Mettre en place un programme R&D pour faire face à la perte des connaissances en matière de design dans l'industrie d'impression 3D, incluant le développement et l'utilisation des logiciels appropriés et l'intégration du design et de la production.
3. Fournir un soutien à l'activité de conception stratégique dirigée par le défi afin d'identifier les possibilités de l'impression 3D et aider les entreprises à développer de nouvelles offres via l'impression 3D.

Matériaux et procédés

1. Collaboration et publication d'études de cas sur les meilleures pratiques en matière d'adoption de l'impression 3D dans tous secteurs et toute taille d'entreprises, couvrant toutes les questions techniques et commerciales pertinentes.
2. Financer l'activité de R & D autour de la création d'outils d'enseignement en ligne pour les utilisateurs potentiels dans des domaines tels que l'approvisionnement en matière première et sélection de procédés. Par exemple, en s'appuyant sur l'expérience réussie de certaines entreprises.
3. Soutenir la R & D et d'autres programmes pour développer la capacité d'équipement en vue d'augmenter la productivité, la stabilité des procédés et d'autres domaines. En s'appuyant sur un exercice de cartographie de l'offre d'impression 3D du Royaume-Uni, le

programme couvrirait également d'autres éléments de la chaîne de production tels que l'usinage de finition et l'approvisionnement en matériaux.

4. Soutenir la R & D et d'autres programmes pour développer les connaissances en matière d'optimisation des procédés de fabrication, y compris le post-traitement.
5. Continuer et augmenter le financement pour le développement de nouveaux matériaux conçus pour l'impression 3D - reconnu comme une opportunité importante pour le Royaume-Uni

Contrôles, tests et standards

1. Mise en place et communication des normes de fabrication d'impression 3D avec les industries travaillant en collaboration avec les organisations de normalisation pertinentes pour soutenir l'adoption industrielle à court, moyen et long terme pour les technologies actuelles et émergentes d'impression 3D.
2. Développer et partager des procédés de tests non destructifs (CND) et de tests mécaniques adaptés à l'impression 3D pour permettre une évaluation «adaptée à l'objectif» des besoins génériques et sectoriels. Cela inclurait tous les éléments techniques pertinents et les données sur les biens matériels accessibles.
3. Élaborer et tenir à jour une base de données sur les propriétés et les normes des matériaux des technologies actuelles et émergentes d'impression 3D.

Commerce, propriété intellectuelle et organisation des données.

1. Effectuer des exercices coordonnés pour identifier les problèmes de propriété intellectuelle liés à la technologie de l'impression 3D et de l'industrie numérique (y compris les licences, les méthodes de paiement, la conception et la collaboration). Définir un programme de travail collaboratif pour aborder les problèmes identifiés, en soulignant les rôles et les responsabilités.
2. Mettre en œuvre une définition de produits issus de l'impression 3D et un programme d'action concertée.
3. Commander et publier des études de cas sur les aspects économiques de l'impression 3D et des plans d'affaires (*business models*) d'impression 3D pour fournir des preuves afin d'aider la communauté financière à faire des investissements permettant aux entreprises de toutes tailles d'adopter l'impression 3D. Cela vise à faire mieux comprendre ce qu'est l'impression 3D au sein de la communauté financière, résultant ainsi de moins de frilosité auprès des banques et donc plus d'adoption de l'impression 3D dans les entreprises.

Compétences et formation

1. Développer des compétences à court, moyen et long terme, ainsi que mettre en place les mécanismes d'enseignement appropriés pour la main-d'œuvre actuelle et future, y compris l'apprentissage et la formation professionnelle. Fournir un financement public pour les programmes d'accroche qui seront mis en avant par l'industrie.
2. Continuer à travailler sur le groupe d'intérêt du KTN « *KTN additive manufacturing special interest group* » afin d'établir un réseau de force de travail dans le domaine de l'impression 3D à travers tout le Royaume-Uni.

3. Créer et gérer une campagne de sensibilisation à l'impression 3D pour aider les entreprises de toutes tailles et de tous secteurs à accélérer l'adoption de celle-ci à court, moyen et long terme.

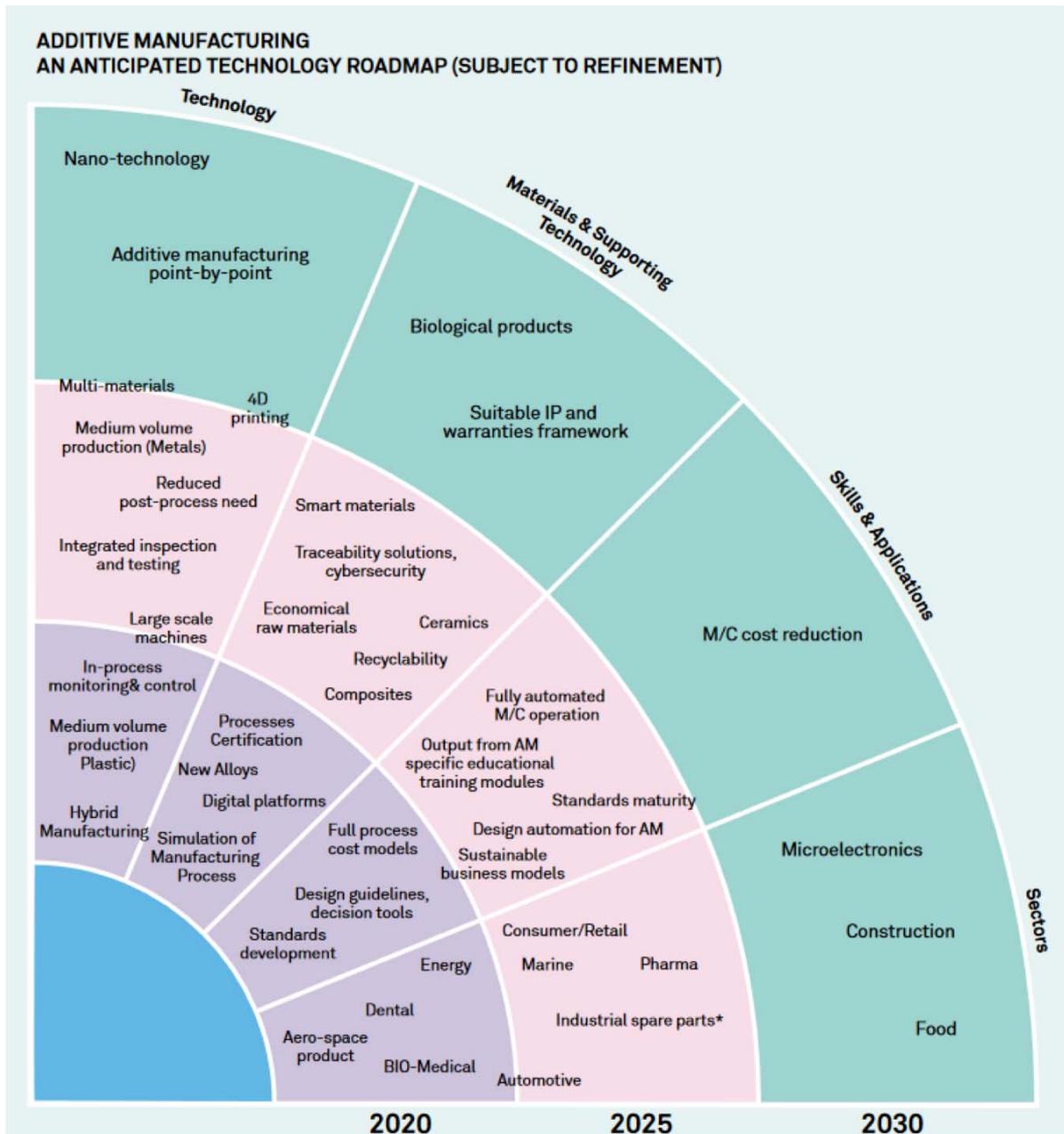
Expansion de la chaîne d'approvisionnement

1. Produire une carte complète de la capacité et de la capacité de la chaîne d'approvisionnement de l'impression 3D du Royaume-Uni. Déterminer les lacunes et les priorités stratégiques du Royaume-Uni. Financer un programme d'activités diverses pour répondre aux faiblesses stratégiques.
2. Commander et tenir à jour une carte en ligne des capacités de la chaîne d'approvisionnement de l'impression 3D au Royaume-Uni. Déterminer les lacunes et financer un programme pour remédier aux faiblesses stratégiques.
3. En s'appuyant sur un exercice de cartographie de la chaîne d'approvisionnement de l'impression 3D au Royaume-Uni, le programme couvrirait également d'autres éléments de la chaîne de production tels que l'usinage de finition et l'approvisionnement en matériaux.
4. Étendre le programme Catapult '*Reach*' ciblant les PME.

Mise en œuvre

1. Développer des liens vers tous les aspects de l'espace numérique, en établissant des liens avec les activités pertinentes de la chaîne d'approvisionnement et faire suivre par des recommandations dans le monde numérique et réel.
2. Clarifier les licences, les méthodes de paiement, la conception et la collaboration liées à l'impression 3D. Définir un programme de travail collaboratif pour faire face aux problèmes.
3. Mettre en œuvre la phase 2 d'investissement au sein du Centre national d'impression 3D, en développant l'impression 3D au sein de Hubs.
4. Soutenir le développement d'un groupe d'experts britannique d'impression 3D, semblable au modèle (réussi) Etats-Uniens.
5. Établir et gérer une organisation nationale d'aide et de points de contact.

Le schéma ci-dessous résume très bien la feuille de route de l'impression 3D/4D.



En complément, le document ci-dessous présente sous forme synthétique (2 pages)) une analyse comparative des actions développées en la matière dans plusieurs pays : Chine, Allemagne, Japon, Corée du Sud, Etats Unis.

Comparison of international approaches to public support for additive manufacturing/3D printing

Mars 2016

<http://www.amnationalstrategy.uk/wp-content/uploads/2015/05/UK-AM-National-Strategy-Update-Report-3-v2.pdf>

L'impression 3D aux Etats-Unis

Note rédigée par Clémentine Desigaud et Hervé Martin (Service pour la Science et la Technologie à l'Ambassade de France aux Etats-Unis) et Marc Lendermann (Service Economique Régional à l'Ambassade de France aux Etats-Unis). Relecture par Philippe Perez (Service pour la Science et la Technologie au Consulat de France à San Francisco)

1. Encadrement et soutien à l'impression 3D par le gouvernement américain

1.1. L'impression 3D présentée comme une solution pour préserver l'industrie manufacturière par l'administration Obama (2009-2017)

Si la notion de politique industrielle parle peu aux Américains – l'idée que l'Etat puisse jouer un rôle de soutien à un secteur ou une entreprise est généralement rejetée (« *the market knows best* ») – la préservation de l'industrie manufacturière est pour autant perçue par les pouvoirs publics américains comme une nécessité pour la reprise économique et la croissance de long terme ainsi que pour des raisons sociales et politiques. Le Président Obama avait placé la renaissance du secteur manufacturier comme thème majeur de son action politique, à la fois dans son discours et dans l'intervention de l'Etat fédéral dans la politique industrielle avec notamment le plan de sauvetage de l'industrie automobile.

Dans cette optique, l'impression 3D était justement perçue par l'administration Obama comme un moyen de préserver l'industrie manufacturière et les emplois américains en relocalisant les activités de production sur le territoire national, notamment au sein de la « Rust Belt » autrefois dynamisée par ses industries lourdes.

L'impression 3D, associée à la chaîne de production numérique, remet en cause le modèle dominant des dernières décennies, appuyé sur des chaînes de production globales où une partie des activités de production et d'assemblage sont localisées dans des pays émergents à faible coût du travail. Les pouvoirs publics sous la précédente administration soutenaient l'idée que l'impression 3D pourrait rendre la production sur le sol national plus compétitive que la délocalisation, du fait (i) d'une empreinte carbone moindre, (ii) d'un haut degré de personnalisation possible et (iii) d'une livraison rapide. Sur le premier point, le *Department of Energy* estime en effet que les technologies additives permettraient d'économiser 50% d'énergie par rapport aux procédés manufacturiers « soustractifs ».

1.2. Le réseau d'instituts pour l'innovation industrielle

Le National Network of Manufacturing Innovation

Pendant sa présidence, Obama a renforcé le soutien fédéral à l'innovation industrielle en créant notamment un réseau d'instituts pour l'innovation industrielle (*Manufacturing USA Institutes*): le *National Network of Manufacturing Innovation* (NNMI). Ces institutions ont vocation à structurer les clusters dans les secteurs manufacturiers d'avenir via un co-financement public-privé. Leur objectif est d'assurer l'avenir de l'industrie manufacturière aux Etats-Unis à travers l'innovation, la formation et les

partenariats publics-privés. Le communiqué de presse de la Maison Blanche présentait la création du NNMI comme faisant partie « des efforts continus pour aider à revitaliser l'industrie manufacturière américaine et encourager les entreprises à investir aux Etats-Unis » (« *ongoing efforts to help revitalize American manufacturing and encourage companies to invest in the United States* »)¹.

Le National Additive Manufacturing Innovation Institute

Dans ce réseau, l'institut pilote *National Additive Manufacturing Innovation Institute* (NAMII, aussi appelé *American Makes Institute*) est spécialisé sur le thème de l'impression 3D. Il regroupe plus de 80 industriels (dont Boeing, Lockheed Martin, Siemens, GE, Johnson & Johnson, Eaton Corporation et Johnson Controls), une trentaine d'universités, plusieurs *community colleges* (instituts de formation professionnelle) et des organisations à but non-lucratif. Cet institut a été créé en 2012 à Youngstown dans l'Ohio, un Etat au cœur de la Rust Belt souffrant particulièrement de la désindustrialisation et du déclin économique, grâce à un investissement fédéral initial de 30M USD (venus du *Department of Defense* et du *Department of Energy*) complété par des apports des universités et entreprises à hauteur de 40M USD. Il a joué le rôle d'institut pilote dans la création du NNMI.

L'*American Makes Institute* a pour mission d'accélérer l'adoption de l'impression 3D et des technologies associées par l'industrie manufacturière. Parmi les actions déjà initiées, on compte l'implantation d'une *Innovation Factory* équipée de systèmes d'impression 3D ainsi que la conduite de programmes de formation et de mentorat dans le domaine de l'impression 3D. L'*American Makes Institute* a ainsi récemment collaboré avec l'organisation *3D Veterans*, le *Center for Additive Technology Advancement* de GE et l'Université Robert Morris afin de proposer un programme de formation à l'impression 3D aux vétérans américains (« *Additive Manufacturing Bootcamp* »).

L'Advanced Regenerative Manufacturing Institute

Dans le même réseau, l'*Advanced Regenerative Manufacturing Institute* (ARMI), qui compte plusieurs dizaines d'entreprises membres, a commencé ses opérations en 2017 après avoir reçu un financement de 80M USD de la part du *Department of Defense* dans le cadre d'un appel à projet pour l'établissement d'un institut de pointe travaillant à la fabrication de tissus et organes humains pour soigner les patients militaires et civils (BioFabUSA). Premier institut américain à travailler sur la question de la bio-fabrication, l'ARMI a été établi à Manchester, New Hampshire, qui fut autrefois une capitale mondiale de l'industrie manufacturière et qui espère ainsi devenir la capitale de la médecine régénérative. Cet institut (comme les autres du réseau) cherche à combler l'espace entre la recherche scientifique initiale et le développement produit plus avancé, en faisant progresser des technologies cruciales pour la mise en place d'activités de production manufacturières à grande échelle.

1.3. Autres initiatives notables

Outre leur participation au réseau des *Manufacturing Institutes*, de nombreuses agences fédérales ont développé des activités liées à l'impression 3D dans leurs domaines respectifs.

Aéronautique

La *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) mène des projets visant à produire toutes les parties des fusées par des techniques d'impression tridimensionnelle. La NASA a par ailleurs équipé la Station spatiale internationale d'une imprimante 3D Zero-G en 2014.

¹ <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2012/08/16/we-can-t-wait-obama-administration-announces-new-public-private-partners>

Défense/Armement

La *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA) mène également plusieurs projets expérimentant avec la fabrication additive dans l'industrie de la défense. En 2014, le *Secretary of Defense* (*Department of Defense*) annonçait le lancement de la « *Defense Innovation Initiative* » afin de développer et déployer de nouveaux systèmes s'appuyant sur des technologies telles que la robotique, la miniaturisation, le big data et l'impression 3D. Les Marines furent le premier service à imprimer en 3D des munitions et des pièces de rechange pour leurs systèmes d'armement. Au début de l'année 2017, les Marines ont dévoilé leurs plans pour prototyper, fabriquer et déployer des micro-drones de surveillances.

1.4. Encadrement de l'impression 3D

Produits alimentaires et médicamenteux

L'agence américaine des produits alimentaires et médicamenteux (*Food and Drug Safety Agency*) est en charge de l'examen des produits médicaux créés par des techniques de la fabrication additive et a récemment publié un guide visant à accompagner l'impression 3D pour les acteurs industriels de l'équipement médical². En ce qui concerne l'impression 3D des produits alimentaires, il semblerait que ce domaine ne soit pas actuellement régulé aux Etats-Unis.

Par ailleurs, la fabrication de vaisselle par impression 3D peut nuire à la sécurité alimentaire : il a été montré que la vaisselle fabriquée à partir de filaments ABS et PLA (les plus courants en impression 3D) pouvait contenir des résidus chimiques dangereux et que les bactéries pouvaient se développer rapidement dans les microfissures des objets imprimés³.

Domaine militaire

En 2013, le *State Department* a interdit à une association de continuer à mettre en ligne des plans pour produire des armes à feu en utilisant des imprimantes 3D, car ceci constituerait une violation aux règles relatives au commerce des armes à feu.

A moyen terme, une intervention de la puissance publique pourra être envisagée, par exemple afin d'adopter les règles relatives au commerce de ces armes (*International Trade in Arms Regulations, ITAR*) en interdisant la production de celles-ci par des imprimantes 3D. Jusqu'à présent, des projets de loi introduits par des élus démocrates et visant à modifier la législation en place n'avaient pas été adoptés par le Congrès.

A plus court terme, il reste également à observer comment la Cour Suprême se prononcera sur la constitutionnalité de la décision du *State Department* d'interdire de mettre en ligne des plans pour la production des armes à feu par l'impression 3D.

Propriété intellectuelle et contrôle des résultats

La fabrication additive s'associe naturellement à l'open source et à l'innovation ouverte.

Deux risques majeurs à noter toutefois : la gestion des droits de propriété intellectuelle et la perte de contrôle sur les produits qui pourraient être dénaturés par des utilisateurs. De fait, si la conception de produits à imprimer en 3D est une source majeure de création de valeur, un principe d'innovation ouverte aurait pour effet de ne pas rémunérer les créateurs de valeur, mais les seuls consommateurs.

Risques sanitaires

² <https://www.fda.gov/MedicalDevices/ProductsandMedicalProcedures/3DPrintingofMedicalDevices/default.htm>

³ <https://americanlibrariesmagazine.org/2016/10/11/the-health-effects-of-3d-printing/>

Les risques sanitaires liés à l'utilisation d'imprimantes 3D n'ont pas encore fait l'objet d'une régulation spécifique. Toutefois, plusieurs études⁴ ont déjà démontré que les imprimantes 3D qui chauffent des filaments de plastique produisent par décomposition thermique un volume important de particules ultrafines et de composés organiques volatils. Ces particules et composés sont associés à divers risques sanitaires (asthme, problèmes cardiovasculaires, transfert d'éléments toxiques dans le sang et les tissus). Il est ainsi recommandé de placer les imprimantes 3D dans une pièce ventilée et de privilégier les modèles disposant d'un système de ventilation intégré.

2. Situation économique et appropriation par l'industrie et la société

2.1. Principaux secteurs industriels concernés

L'impression 3D est utilisée dans une grande variété de secteurs industriels, mais le degré d'appropriation varie. Quelques exemples :

- Selon une étude de l'entreprise *UPS*, le secteur automobile utilise la technologie pour créer des prototypes plutôt que pour fabriquer des pièces composant ses produits⁵.
- Les producteurs de casques audio, par contre, ont adopté cette technologie très rapidement et créent une grande partie de leurs produits en utilisant des imprimantes 3D⁶.
- Dans le secteur spatial, l'entreprise américaine *Rocket Lab* qui utilise des parties des fusées produites par des techniques d'impression 3D, a récemment lancé un vol test.⁷
- Les dentistes bénéficient également de l'impression 3D puisque cette technologie pèse déjà 780M USD sur le marché dentaire selon un rapport *SmarTech*⁸.
- De manière générale, l'impression 3D est de plus en plus intégrée dans les pratiques médicales : aux Etats-Unis, 99 hôpitaux américains comptaient une installation centralisée d'impression 3D en 2016, contre 50 en 2014 et 24 en 2012⁹. L'utilisation de modèles anatomiques imprimés en 3D permet aux radiologistes d'approfondir leurs analyses et aux chirurgiens de mieux préparer leurs opérations.
- Dans le BTP, la fabrication additive apporte de nombreux progrès (« contour crafting »).¹⁰
- L'impression 3D commence à séduire le marché des biens de consommation : en 2017, Adidas a annoncé la création d'un partenariat avec une entreprise d'impression 3D de la Silicon Valley, Carbon3D, afin de créer des semelles pour des chaussures d'athlétisme de haut niveau. Adidas espère produire 100 000 paires de ces chaussures Futurecraft 4D d'ici à fin 2018¹¹.

Selon l'étude *UPS*, les biens produits par l'impression 3D aux Etats-Unis constituaient moins de 1% de tous les biens produits aux Etats-Unis en 2015.¹² Mais à terme, l'ensemble des secteurs industriels

⁴ <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26550911>; <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.est.5b04983>

⁵ https://www.ups.com/media/en/3D_Printing_executive_summary.pdf

⁶ https://www.ups.com/media/en/3D_Printing_executive_summary.pdf

⁷ <https://www.wsj.com/articles/startup-rocket-lab-puts-satellites-in-orbit-for-first-time-in-successful-test-flight-1516507208?mod=searchresults&page=1&pos=1>

⁸ <https://www.smartechpublishing.com/reports/3d-printing-in-dentistry-2015-a-ten-year-opportunity-forecast-and-analysis>

⁹ <http://www.materialise.com/en/blog/3D-printing-us-hospitals>

¹⁰ Cf. <http://money.cnn.com/2017/05/02/technology/3d-printed-building-mit/index.html>

¹¹ <http://money.cnn.com/2017/04/07/technology/adidas-3d-printed-shoe>

¹² https://www.ups.com/media/en/3D_Printing_executive_summary.pdf

pourraient être concernés de près ou de loin par l'impression 3D, qu'il s'agisse des prototypes, de composants à assembler ou de produits finis. CBInsights dresse un panorama du marché de l'impression 3D autour de 4 grandes activités : (i) les activités de service, elles-mêmes réparties entre les médias, la santé, les logiciels, les outils de design et les places de marché, (ii) les activités de production et de commercialisation de produits 3D, (iii) la production agro-alimentaire 3D et (iv) les matériels d'impression 3D personnels.



2.2. Quelques acteurs notables

Grandes entreprises américaines

Plusieurs grandes entreprises industrielles sont actives dans ce domaine, par exemple *General Electric* (GE) et *Johnson & Johnson*. GE a notamment développé son propre centre de R&D (*Center for Additive Technology Advancement*) à Pittsburgh en 2016¹³ et a fait l'acquisition de deux leaders de l'imprimante 3D, Arcam et Concept Laser. GE investit également dans de nombreuses startups. Par ailleurs, l'entreprise californienne HP a été l'un des premiers producteurs des imprimantes classiques 2D à se lancer dans l'impression 3D.

Startups américaines développant des technologies innovantes d'impression 3D

Plusieurs startups américaines produisent des imprimantes 3D et développent des technologies innovantes. Quelques exemples :

¹³ <https://www.additivemanufacturing.media/news/-ge-opens-additive-manufacturing-center-in-pittsburgh>

- La startup Carbon3D fabrique des imprimantes 3D basées sur une technologie propriétaire innovante (Continuous Liquid Interface Production). Aujourd'hui valorisée à 1,7Md USD, c'est la startup d'impression 3D ayant levé le plus de fonds en 2017 (200M USD). Parmi les investisseurs, on retrouve l'entreprise de capital risque Sequoia ainsi que General Electric et Hydra Ventures, la branche d'investissement d'Adidas. Ce nouveau soutien va permettre à Carbon3D de s'étendre sur le marché des produits électroniques grand public et du dentaire/médical. La présence d'Adidas n'est pas surprenante, les chaussures étant l'une des dernières tendances en matière d'impression 3D.
- La start-up Dekstop Metal, novatrice dans l'impression d'objets métalliques, a levé 115M USD en 2017 auprès des investisseurs habituels (GE) ainsi que Google. Cette start-up, fondée dans le Massachussets en 2015, a développé deux solutions : Studio et Production. Studio permet d'imprimer rapidement des prototypes en métal et est déjà utilisé par Caterpillar et BMW. Production sera le premier système d'impression 3D permettant la production de masse de pièces en métal, cent fois plus rapide et bien moins cher que les technologies additives actuellement utilisées.
- La startup Markforged, qui imprime des pièces détachées en métal et carbone, vient également du Massachussets et compte parmi ses investisseurs Porsche, Microsoft et Siemens (levée de fonds de 30M USD en 2017).
- Divergent 3D, start-up de Los Angeles fondée en 2013, a levé 65M USD en 2017. Elle se spécialise dans l'impression de véhicules et vise particulièrement le marché des voitures électriques : son châssis plus léger et plus solide permettrait d'augmenter la distance que peuvent parcourir les voitures électriques. Elle estime pouvoir construire une usine de production avec des imprimantes 3D de métal à grande échelle pour un prix largement inférieur à celui d'une usine de voitures traditionnelle.
- La startup UNIZ Technology, fondée à San Diego, utilise la technologie UDP (Uni-Directional Peel) pour fabriquer des imprimantes particulièrement rapides. Présente au CES de Las Vegas, elle a également lancé une campagne de crowdfunding pour promouvoir ses imprimantes « de bureau » auprès de son public cible, les professionnels et notamment le marché médical. Pour moins de 1000 USD, les donateurs pouvaient recevoir une imprimante en échange.
- La startup californienne Apis Cor est spécialisée dans l'impression 3D de bâtiments. En 2017, elle a construit sa première maisonnette près de Moscou à partir de matériaux d'une valeur à peine supérieure à 10 000 USD. Une journée a suffi pour que le robot d'impression 3D fabrique cette maison de 40m²¹⁴.
- En 2017, la startup BeeHex a levé un financement d'amorçage de 1M USD pour lancer son premier produit, une imprimante à pizza nommée « Chef 3D » fonctionnant via un système pneumatique plutôt qu'avec des technologies additives classiques. Sur le long terme, la startup souhaite créer un réseau d'imprimantes capables de fabriquer des snacks sur le champ et personnalisés selon les envies du consommateur. L'imprimante à pizza pourrait déjà intéresser des chaînes de pizzerias¹⁵.

Startups et petites entreprises américaines de l'impression à la demande

Les acteurs offrant des services d'impression 3D aux particuliers (une forme de « *3D printing as a service* ») se multiplient :

¹⁴ <http://www.businessinsider.com/house-built-one-day-apis-cor-2017-3>

¹⁵ <https://techcrunch.com/2017/02/28/bee-hex-cooks-up-1-million-for-3d-food-printers-that-make-pizzas/>

- La start-up 3D Hubs, basée à Amsterdam et New York, est à l'origine d'un réseau connectant 28 000 imprimantes 3D dans 156 pays. Les utilisateurs peuvent ainsi faire imprimer leur modèle près de chez eux.
- L'entreprise AtFAB conçoit des modèles de meubles qui peuvent être envoyés à des routeurs CNC, des machines travaillant le bois d'une manière comparable aux imprimantes 3D.
- La start-up Shapeways, basée à New York, fonctionne comme une place de marché sur laquelle les utilisateurs peuvent créer leurs fichiers imprimables en 3D et les faire imprimer par Shapeways pour leur consommation personnelle ou pour des clients.
- A Brooklyn, l'entreprise Voodoo Manufacturing possède 160 imprimantes 3D et propose à ses clients de fabriquer des petits volumes (leur devise : « *bridge the gap between prototype and mass production* »). Voodoo est passé de 4 employés en 2015 à 17 aujourd'hui et prévoit de créer 20 emplois supplémentaires dans les deux prochaines années¹⁶.

2.3. Taille du marché et impact sur l'emploi

Taille du marché

Une première mesure de l'évolution du marché est indiquée par le nombre croissant de dépôt de brevets dans le domaine. Ainsi, selon le bureau américain des brevets et des marques de commerce, *U.S. Patent and Trademark Office (USPTO)*, 8 000 brevets ont été déposés dans le domaine des technologies de fabrication additive en 2016¹⁷ (pour un nombre total de dépôts de brevets de 650 411¹⁸). Toutefois, cela ne représente encore que 1% des brevets déposés aux Etats-Unis.

Les innovations dans le domaine de l'*advanced manufacturing* devraient continuer à irriguer le secteur industriel américain et de nouveaux outils de production devraient apparaître au cours des prochaines années, mais il est difficile d'en prédire le rythme. Une croissance dans le domaine industriel semble très probable. A court terme, l'entreprise américaine de conseil et de recherche dans le domaine des techniques *Gartner Inc.* prédit que jusqu'en 2021, 20 % des entreprises vont établir des cellules internes pour développer des nouveaux produits et services basés sur l'impression 3D et que 40 % des entreprises du secteur manufacturier vont établir des centres d'excellences pour l'impression 3D. Selon un sondage de l'entreprise *Sculpteo* de 2017, les entreprises interrogées veulent augmenter leurs investissements dans l'impression 3D de 55 % par rapport aux dépenses de l'année précédente.¹⁹ Une récente analyse d'A.T. Kerney montre que l'impression 3D pourrait rapporter près de 900 Md USD en valeur économique aux Etats-Unis dans les dix prochaines années²⁰.

Cela étant, les analystes financiers observent également une réduction récente des investissements en capital-risque dans les entreprises innovantes spécialisées. CBInsights relève ainsi que les levées de fonds pour les entreprises spécialisées dans ce secteur ont connu une forte évolution entre 2013 et 2015, avant de fléchir en 2016. 2017 pourrait toutefois être une année de rebond (les chiffres ne sont pas encore disponibles).

¹⁶ <http://money.cnn.com/2017/03/27/news/economy/american-manufacturing-jobs/index.html>

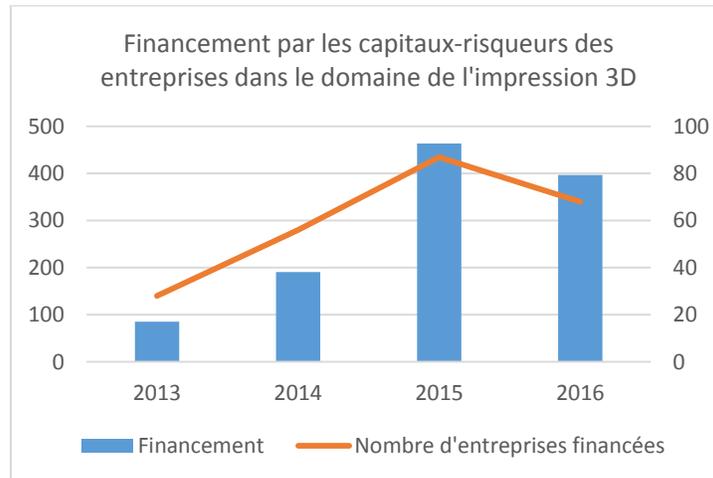
¹⁷ <https://www.commerce.gov/news/blog/2017/07/3d-printing-new-industry-made-america>

¹⁸ <https://www.uspto.gov/sites/default/files/documents/USPTOFY16PAR.pdf>, p. 179.

¹⁹ https://www.sculpteo.com/media/ebook/State%20of%203DP%202017_1.pdf

²⁰

<https://www.atkearney.com/documents/20152/888957/3D+Printing+and+the+Future+of+the+US+Economy.pdf/7719fc50-50b9-6194-4c4c-c3de38e9a88c>



Sources : CB Insights 2017

Impact sur l'emploi

L'emploi dans le secteur de l'industrie manufacturière s'est réduit de moitié par rapport à son âge d'or de la fin des années 70. L'automatisation est la principale raison expliquant la perte de 5 millions d'emplois manufacturiers depuis 2000 aux Etats-Unis : une étude de Ball State University rapporte que 87% des pertes d'emplois dans les usines américaines entre 2000 et 2010 sont dues à des pratiques plus efficaces, notamment à cause d'avancées technologiques²¹. L'imprimante 3D pourrait au contraire être un exemple de technologie faisant progresser l'emploi –du moins l'emploi qualifié. L'étude d'A.T. Kearney prédit que l'utilisation de l'impression 3D dans l'industrie pourrait créer 3 à 5 million d'emplois qualifiés aux Etats-Unis dans les dix prochaines années.²² Les entreprises d'impression 3D déplorent néanmoins le manque de formations pratiques²³.

2.3. Quelques perspectives en question

Quant à l'impact potentiel de la fabrication additive sur la société américaine, ce sont surtout des *think tanks* qui se sont prononcés. A titre d'exemple sont à mentionner la *Brookings Institution*²⁴, la *Rand Corporation*²⁵ et *American Foreign Policy Committee* (ces derniers ayant publié sur l'impact potentiel de l'impression 3D dans le domaine de défense).²⁶

Vers une « personnalisation de masse » ?

²¹ <https://conexus.cberdata.org/files/MfgReality.pdf>

²²

<https://www.atkearney.com/documents/20152/888957/3D+Printing+and+the+Future+of+the+US+Economy.pdf/7719fc50-50b9-6194-4c4c-c3de38e9a88c>

²³ <http://money.cnn.com/2017/03/27/news/economy/american-manufacturing-jobs/index.html>

²⁴ <https://www.brookings.edu/blog/techtank/2015/12/08/additive-manufacturing-builds-concerns-layer-by-layer/>

²⁵ <https://www.rand.org/pubs/perspectives/PE229.html>

²⁶ http://www.afpc.org/files/defense_dossier_february_2015.pdf (p. 16 s.)

Selon le NIST (*National Institute of Standards and Technology*), l'un des impacts à long terme à attendre de la généralisation de l'impression 3D est la fabrication individualisée, avec des coûts moins élevés comparés aux méthodes traditionnelles.²⁷ Néanmoins, selon le rapport annuel 2017 de l'entreprise *Sculpteo*, seules 16 % des entreprises ont mentionné la personnalisation comme une priorité de leurs activités, comparé à 18 % dans le sondage de l'année précédente.²⁸

La personnalisation de masse perce toutefois dans certains domaines comme la fabrication de chaussures. Au-delà d'Adidas qui coopère avec la société américaine d'impression 3D *Carbon Inc*, comme mentionné plus haut, les entreprises *Voxel8* et *Wiiivs* offrent également une personnalisation des chaussures en utilisant des imprimantes 3D. *Continuum Fashion*, un portail en ligne fondé à Cambridge, MA, propose aux designers des outils leur permettant de créer et distribuer des modèles 3D de vêtements et chaussures qui pouvant ensuite être imprimés. Les bijoux et objets de décoration pourraient également profiter de la personnalisation de masse. Ce sont les premières catégories de la place de marché de la startup *Shapeways*, citée plus haut, qui propose aux utilisateurs d'imprimer leurs modèles en 55 matériaux différents (plastique, métaux précieux, acier, porcelaine). Enfin, comme mentionné plus haut, le secteur dentaire bénéficie déjà fortement de la personnalisation permise par l'impression 3D²⁹. En dehors de ces initiatives limitées, l'essor de la personnalisation de masse reste incertain.

Vers un usage domestique de l'imprimante 3D ?

Les conséquences potentielles de l'impression 3D sur l'industrie sont aussi discutées dans la littérature américaine. L'essayiste américain *Jeremy Rifkin*, par exemple, avance dans son livre *La nouvelle société du coût marginal zéro* paru en 2014 que l'impression 3D et d'autres technologies innovantes permettraient de produire des biens manufacturés en abondance à un coût marginal proche de zéro, remettant en cause le modèle du capitalisme au profit d'une communauté de « prossomateurs » (à la fois consommateurs et producteurs). Grâce aux imprimantes 3D, nous passerions d'après lui d'« une production de masse à une production par les masses ».

Mais même si certains experts prédisent également que nous disposerons à l'avenir d'imprimantes 3D personnelles, ces imprimantes devraient être assez volumineuses pour produire des objets comme des meubles par exemple et alimentées avec des matériaux bruts, si bien que dans des territoires où l'espace domestique est contraint, comme les centres urbains, ce modèle risque de se heurter à des contraintes. Les problèmes sanitaires évoqués plus haut constituent également un obstacle.

Vers un modèle « distributed manufacturing » ?

Le concept de « distributed manufacturing », l'une des tendances à suivre selon le World Economic Forum³⁰, reflète l'idée que les entreprises vont faire imprimer leurs produits dans des petites usines locales, situées dans chaque ville ou quartier, prêts à être récupérés par les consommateurs. Déplacer la production manufacturière directement là où la demande se trouve permet de réduire les coûts de transport et la gestion des stocks. Les entreprises se concentreraient sur le design, le marketing, et la certification des opérations d'impression 3D pour garantir la qualité et l'uniformité des produits. Cette idée est soutenue par la startup 3D Hub, dont le co-fondateur Bram de Zwart soulignait : « *Why would you put a thousand machines in one place when you can put one machine in a thousand places ?* ». Dans cette optique, le *Department of Defense* imagine pouvoir imprimer sur place des pièces personnalisées

²⁷ <https://www.nist.gov/topics/additive-manufacturing/additive-manufacturing-faqs>

²⁸ https://www.sculpteo.com/media/ebook/State%20of%203DP%202017_1.pdf (p. 20).

²⁹ <https://www.smarttechpublishing.com/reports/3d-printing-in-dentistry-2015-a-ten-year-opportunity-forecast-and-analysis>

³⁰ <https://www.weforum.org/agenda/2015/03/emerging-tech-2015-distributed-manufacturing/>

pour ses systèmes opérationnels, qui seraient sinon coûteuses à fabriquer ou à expédier : les Marines embarquent des imprimantes 3D sur leurs bateaux, et la Station spatiale internationale en est équipée pour imprimer des pièces de rechange.

3. Avancées scientifiques et projets de recherche

3.1. Impression de matériaux « traditionnels »

- En ce qui concerne le secteur BTP, d'importantes recherches sur la fabrication additive des bâtiments (« *contour crafting* ») ont été conduites par *Behrokh Khoshnevis* de l'université de Californie du Sud.
- Metal Printing : North Carolina State University : <https://news.ncsu.edu/2017/12/metal-printing-electronics-2017/>
- Graphene printing : Travaux du MIT "MIT creates 3D printed graphene that's lighter than air, 10X stronger than steel" <https://www.computerworld.com/article/3155102/emerging-technology/mit-creates-3d-printed-graphene-thats-lighter-than-air-10x-stronger-than-steel.html>
- Graphene printing : Graphene 3D Lab : <https://www.graphene-info.com/graphene-laboratories>

3.2. Impression de nanomatériaux

- Nanoprinting : <https://www.technologyreview.com/s/408664/nanoscale-inkjet-printing/>
- Nanoprinting : <https://cosmosmagazine.com/technology/new-nano-printing-process-could-dramatically-increase-processing-power>

3.3. Impression du vivant

- Bio printing : Heart tissue . Voir video de la NSF https://www.nsf.gov/news/special_reports/science_innovation/01_3D_bioprinting.jsp
- Bio printing : Inspired Nanomaterials and Tissue Engineering (iNanoTE) Lab / Texas A&M. Akhilesh Gaharwar gaharwar a reçu une grant NSF sur "3D Bioprinting of Complex Tissue Structures"
- Bio printing : autre grant NSF sur " Bioprinting of Bone Tissue " https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1600118

3.4. Impression 4D

L'objet de l'impression 4D est de réaliser des objets 3D réactifs capables de changer de forme ou de propriétés au cours du temps. Il s'agit donc d'intégrer certaines technologies de matériaux actifs et intelligents à l'impression 3D pour créer des composants qui pourront changer leurs propriétés dans un contexte spécifique. Les deux principaux polymères utilisés pour l'impression 4D sont les hydrogels et les polymères à mémoire de forme. Les enjeux de l'impression 4D sont de faciliter le processus de fabrication de certaines pièces (auto-assemblage) et de créer de nouveaux objets capables de se déployer ou de se reconfigurer. On peut ainsi imaginer de nouveaux stents (endoprothèses) en médecine ou de nouveaux

actionneurs en robotique. A terme, les spécialistes du domaine imaginent la possibilité d'avoir des matériaux réellement programmables.

L'impression 4D a été inventée aux Etats-Unis par Skylar Tibbits du MIT qui travaille sur l'auto-assemblage. Il s'agit de créer des objets qui s'assemblent ou se modèlent sans intervention extérieure de type capteur, robot ou actions humaines. L'équipe du MIT explore différentes possibilités en s'appuyant sur les propriétés des matériaux, les modes d'assemblages et l'épaisseur. L'équipe est impliquée dans de nombreux projets³¹ sur l'impression 4D dont « Multi-Material Shape Change » en partenariat avec Autodesk pour imprimer des matériaux intelligents et plusieurs prototypes d'auto-assemblage d'objets et de protéines, qui ouvrent de nombreuses perspectives en bionanotechnologie. Ce type d'approche continue de se développer aux Etats-Unis avec notamment les travaux sur l'impression 4D biométrique développés par Harvard. Les travaux de l'équipe de Jennifer A. Lewis³² se sont inspirés de l'exemple des plantes dont différentes parties réagissent à différents stimuli (humidité, lumière, touché) pour imprimer des structures composites à base d'un hydrogel qui changent de forme lorsqu'elles sont plongées dans l'eau.

Le Département de la Défense finance également des recherches dans le domaine du 4D. Northwestern's IIN a ainsi reçu 8,5 Mio USD pour un projet de nanoimpression³³. La NSF a financé plusieurs projets sur différents aspects de ce domaine. Sans viser l'exhaustivité, on peut citer comme exemple « 4D Printing with Photoactive Shape-Changing Polymer » piloté par Drexel University et « 4D Bioprinting of Smart Complex Tissue Constructs » piloté par George Washington University.

Au-delà du 4D, les Etats-Unis cherchent à développer le secteur de l'électronique hybride flexible qui vise à intégrer des composants électroniques dans des vêtements, objets ou structures quelconques. Pour aller dans ce sens, le NIST recommande une stratégie de partenariats inter-agences (*Department of Commerce, Department of Defense, Department of Energy*) pour s'attaquer aux différents défis scientifiques et technologiques.

³¹ http://www.selfassemblylab.net/research_projects.php

³² <https://pdfs.semanticscholar.org/a645/0377766224564d53b0924fdd289df21bab0.pdf>

³³ <https://news.northwestern.edu/stories/2015/06/8.5m-grant-for-developing-nano-printing-technology>