

**Domaine :** Politique technologique, innovation, physique  
**Document :** Rapport d'Ambassade / Consulat Général de France à San Francisco, Californie  
**Titre :** Impression 3D : Les prémisses d'une nouvelle (r)évolution industrielle ?  
**Auteur(s) :** Pierrick Bouffaron (deputy-cleantech@ambascience-usa.org)  
**Date :** Septembre 2014

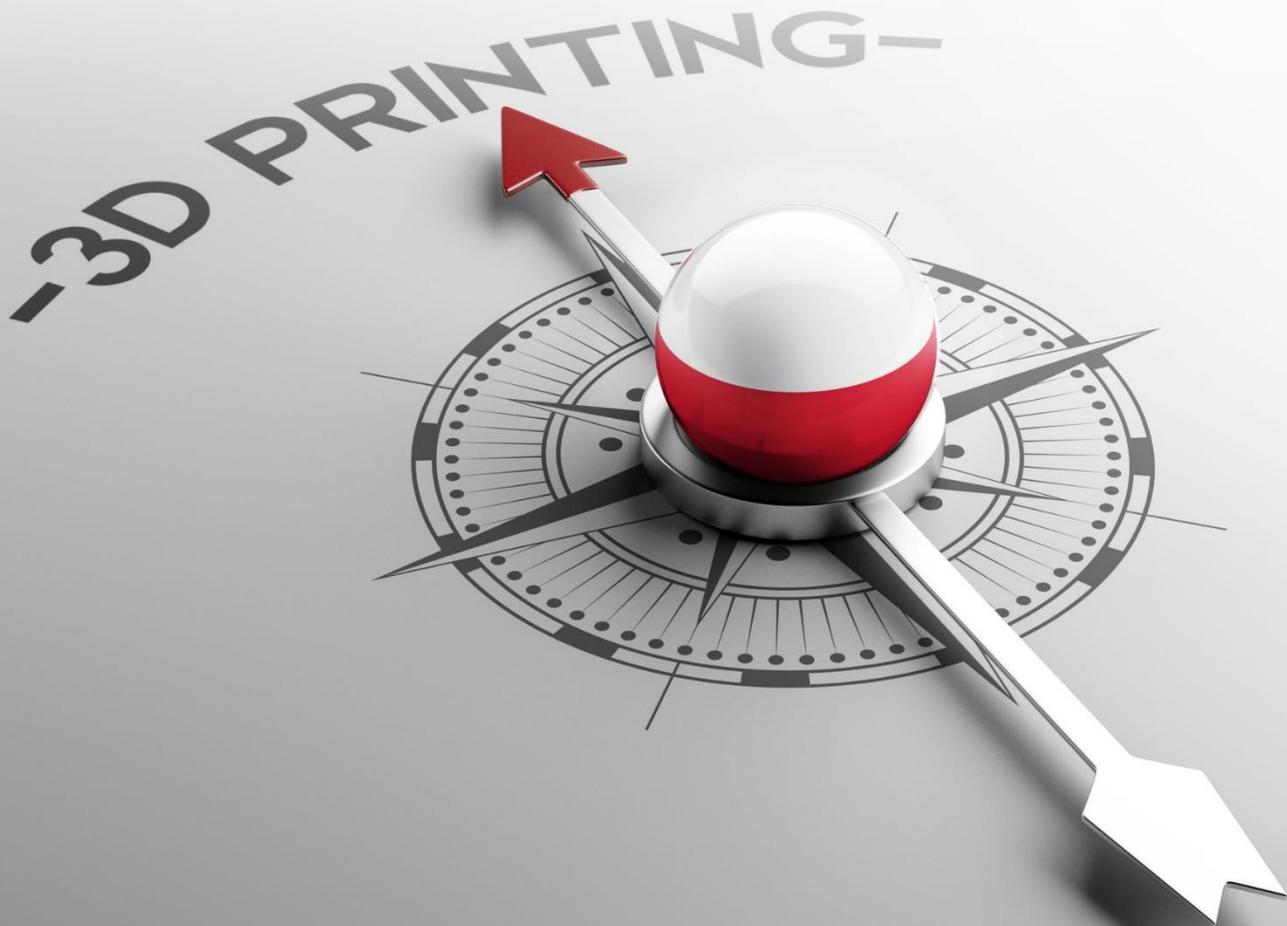
<b>Mots-clés :</b>	Politique technologique, innovation, physique
<b>Résumé :</b>	<p>Depuis quelques années, l'impression tridimensionnelle – plus couramment appelée <i>impression 3D</i> – suscite un intérêt croissant chez les industriels, les passionnés de technologie et les académiques. Les procédés de production par fabrication additive que le terme englobe sont régulièrement présentés comme une rupture du schéma traditionnel des industries manufacturières, notamment en matière de propriété intellectuelle et de relation entre producteurs, vendeurs et consommateurs sur l'ensemble de la chaîne de valeur produit.</p> <p>L'hypermédiatisation qui accompagne la baisse accélérée des prix des imprimantes 3D pourrait méprendre sur l'origine du procédé. Les premières expériences remontent aux années 1960, les pionniers Charles Hull [1] et Scott Crump [2] (les fondateurs respectifs de deux leaders mondiaux actuels du secteur, <i>3D Systems Corp.</i> [3] et <i>Stratasys</i> [4]) ayant alors déposé les premiers brevets. <b>L'impression tridimensionnelle est en réalité un terme chapeau recouvrant plusieurs types de technologies</b>, la stéréolithographie et le frittage sélectif par laser étant les plus courants.</p> <p>Pourtant, malgré le potentiel, les promesses et le buzz autour de l'impression 3D, le développement du secteur s'effectue à un rythme relativement modeste : les moyens de production classiques conserveront la majorité des parts du marché productif à court et moyen termes, et ce sont les segments du prototypage, des productions de faibles volumes et des produits personnalisés qui vont d'abord se distinguer. D'après le rapport <i>Wohlers</i> [26], le marché des imprimantes 3D à destination des particuliers a augmenté de 346% entre 2008 et 2011, grâce notamment au succès du projet open-source <i>RepRap</i>, mais cette croissance a fortement ralenti dans les dernières années [27-28].</p> <p>Que nous réserve le futur ? Certains experts affirment que <b>la prochaine étape sera celle des imprimantes 4D, c'est-à-dire des objets 3D imprimés avec une mémoire contextuelle</b>, capables d'adapter leur comportement à l'environnement immédiat : imaginons, par exemple, une chaussée capable de modifier sa structure interne pour s'adapter aux intempéries. Si nous sommes loin de la fiabilité technique et de la viabilité économique de telles technologies, elles laissent présager des voies potentielles de développement et des ruptures comportementales engendrées par l'essor certain de l'impression... multidimensionnelle ?</p>

# Impression 3D

Les prémisses d'une nouvelle  
(r)évolution industrielle ?

Pierrick Bouffaron

Mission pour la Science et la Technologie  
Consulat Général de France à San Francisco



## RESUME

Depuis quelques années, l'impression tridimensionnelle – plus couramment appelée *impression 3D* – suscite un intérêt croissant chez les industriels, les passionnés de technologie et les académiques. Les procédés de production par fabrication additive que le terme englobe sont régulièrement présentés comme une rupture du schéma traditionnel des industries manufacturières, notamment en matière de propriété intellectuelle et de relation entre producteurs, vendeurs et consommateurs sur l'ensemble de la chaîne de valeur produit.

L'hypermédiatisation qui accompagne la baisse accélérée des prix des imprimantes 3D pourrait méprendre sur l'origine du procédé. Les premières expériences remontent aux années 1960, les pionniers Charles Hull [1] et Scott Crump [2] (les fondateurs respectifs de deux leaders mondiaux actuels du secteur, *3D Systems Corp.* [3] et *Stratasys* [4]) ayant alors déposé les premiers brevets. **L'impression tridimensionnelle est en réalité un terme chapeau recouvrant plusieurs types de technologies**, la stéréolithographie et le frittage sélectif par laser étant les plus courants.

La différence principale de l'impression 3D vis-à-vis des procédés industriels traditionnels basés sur des méthodes de soustraction de matière (par exemple une combinaison de broyage, moulage, soudage et/ou collage) est **la production additive, par couches successives, engageant de petites quantités de matériaux jusqu'à l'obtention d'un produit en trois dimensions**. Le volume du produit est digitalisé dans un fichier CAO (Conception Assistée par Ordinateur), découpé numériquement en couches avant d'être imprimé étape par étape grâce à un mix d'encres et d'additifs (plastiques, métaux ou céramiques) selon le type et la qualité désirée du produit final.

La possibilité de concevoir et d'imprimer des objets à la demande, selon un schéma de fabrication distribué par opposition aux chaînes classiques de production, a **le potentiel de transformer les codes hérités de la révolution industrielle**. Les acteurs dont le modèle d'affaire repose sur une production de masse, désormais fragmentable en productions locales (nous verrons que le transfert n'est pas évident), devront savoir s'adapter face à l'émergence de nouveaux entrants, l'apparition de services novateurs et donc une nouvelle répartition des valeurs marchandes. Le profil des acteurs du secteur manufacturier va évoluer en conséquence : des technologies 3D accessibles à moindre coût ouvrent notamment la voie aux développeurs, entrepreneurs et investisseurs de taille plus modeste. Des contraintes subsistent : le prix des intrants de matière n'est pas uniformément compétitif (citons le cas de la poudre de titane utilisée dans l'industrie, dont la production reste coûteuse) et la maîtrise d'outils CAO reste impérative malgré l'émergence progressive de logiciels 3D plus accessibles.

De nombreux acteurs se positionnent aujourd'hui sur le marché de l'impression tridimensionnelle. Au-delà des fournisseurs d'équipements leaders comme *3D Systems Corp.*, *Stratasys* ou le suédois *Arcam* [5], d'autres géants s'attaquent au filon en ciblant des segments différents : Amazon a lancé son site d'e-commerce permettant d'échanger des fichiers CAO [6-8], eBay a inauguré en 2013 une application permettant de se procurer des objets 3D [9]. *MakerBot*, l'un des leaders de l'impression 3D à destination des particuliers, a fusionné en août 2013 avec *Stratasys*. Fusions-acquisitions, entrées en bourse, nouvelles startups : le paysage de l'impression 3D bouillonne.

Dans un autre registre, les laboratoires et les workshops du type *FabLabs* [10] et *Techshops* [11-12] se développent de manière accélérée aux Etats-Unis mais également en Europe. L'idée ? Celle de **permettre à tout un chacun de créer, tester des designs, produire des objets** dans des espaces de travail et de bricolage communautaires sans avoir à investir dans des équipements coûteux.

Dans le secteur de la santé, l'impression 3D concentre de nombreux espoirs. La plupart des acteurs pharmaceutiques et hospitaliers ont compris l'importance de leur positionnement sur ce marché stratégique : la production de prothèses et d'implants sur mesure, en se basant sur des données sources issues de scanner et d'IRM, et la production de membres robotisés sont les exemples régulièrement rencontrés dans la presse [13-16]. Dans le secteur de l'énergie, l'impression 3D peut également tout bouleverser : à Harvard, une équipe de chercheurs est capable d'imprimer par superposition de minces couches d'électrodes d'épaisseur microscopique afin de produire des batteries lithium-ion plus petites qu'un grain de sable [17]. C'est une avancée majeure les domaines des applications médicales, de l'aérospatial et des télécommunications, des secteurs dans lesquels de nombreux composants résident dans le domaine microscopique. Et les innovations se multiplient : Microsoft développe la technologie *infraStructs*, qui intègre des tags aux objets imprimés en 3D pouvant relayer de l'information grâce à une lecture par scanner [18-19]. L'encodage d'informations complexes pour des applications – notamment militaires – a une forte valeur marchande. Certains leaders de l'industrie du jouet commencent à utiliser l'impression tridimensionnelle sur leurs nouvelles gammes de produits : le géant du jouet Hasbro s'est associé avec le leader *3D Systems Corp.* [20] tandis que le fabricant MakieLab imprime désormais des poupées thermoplastiques [21]. Les constructeurs automobiles s'intéressent à la production de pièces de rechange, notamment pour les anciens modèles de véhicules [22], et l'industrie aérospatiale produit déjà des pièces plus légères grâce aux imprimantes 3D. Les vêtements et accessoires imprimés destinés aux sportifs seront plus légers et résistants afin d'améliorer leurs performances [23]. La NASA travaille à imprimer de la nourriture dans l'espace à destination des astronautes [24-25].

Pourtant, malgré le potentiel, les promesses et le buzz autour de l'impression 3D, le développement du secteur s'effectue à un rythme relativement modeste : les moyens de production classiques conserveront la majorité des parts du marché productif à court et moyen termes, et ce sont les segments du prototypage, des productions de faibles volumes et des produits personnalisés qui vont d'abord se distinguer. D'après le rapport *Wohlers* [26], le marché des imprimantes 3D à destination des particuliers a augmenté de 346% entre 2008 et 2011, grâce notamment au succès du projet open-source *RepRap*, mais cette croissance a fortement ralenti dans les dernières années [27-28].

Que nous réserve le futur ? Certains experts affirment que **la prochaine étape sera celle des imprimantes 4D, c'est-à-dire des objets 3D imprimés avec une mémoire contextuelle**, capables d'adapter leur comportement à l'environnement immédiat : imaginons, par exemple, une chaussée capable de modifier sa structure interne pour s'adapter aux intempéries. Si nous sommes loin de la fiabilité technique et de la viabilité économique de telles technologies, elles laissent présager des voies potentielles de développement et des ruptures comportementales engendrées par l'essor certain de l'impression... multidimensionnelle ?

## CITATIONS

*« La production directe d'objets grâce aux imprimantes 3D change les règles de l'industrie manufacturière : nous assistons à une troisième révolution industrielle. »*

**The Economist, Avril 2012**

*« L'impression 3D ne remplacera pas totalement les procédés classiques de production, mais sert déjà aux industriels comme outil complémentaire permettant d'accélérer le passage de nouveaux produits du design aux marchés. A la manière d'Internet dans les années quatre-vingt-dix et des smart phones durant la dernière décennie, les technologies 3D deviennent largement accessibles et nous entraînent dans une nouvelle ère de personnalisation de masse. »*

**Jonathan Cobb, Vice-Président exécutif, Stratasys, Avril 2014**

*« De manière similaire à Internet qui supprima des verrous du secteur du développement logiciel, l'impression 3D fait tomber de nombreuses barrières du développement produit. Les designers peuvent innover et imprimer leurs travaux à moindre coût, inventer ou mettre à jour leurs designs rapidement, et distribuer leur production en ligne sans investissement direct. »*

**Peter Weijmarshausen, CEO, Shapeways, Avril 2014**

*« Certains des esprits les plus brillants de la planète travaillent actuellement sur l'impression de tissus humains et d'organes. Ils ont déjà démontré la faisabilité de ces impressions : la question est donc plutôt désormais quand et de quelle manière exactement ces produits seront accessibles aux patients. Avant que nous puissions imprimer sur demande des organes complets, le secteur des prothèses personnalisées devrait connaître une croissance impressionnante. »*

**Avi Reichental, Président et CEO, 3D Systems, Décembre 2013**

*« La valeur ajoutée de l'impression tridimensionnelle est importante pour les PME-PMI comme pour les grands groupes industriels, mais l'essor des technologies 3D offre aux acteurs économiques de petite taille la possibilité de développer des solutions rapidement et d'être compétitifs. Des preuves de concepts obtenues plus rapidement à la démocratisation du prototypage, la réduction des coûts est conséquente : les règles du jeu sont en train de changer. »*

**Jan Baum, Directeur exécutif, 3D Maryland, Maryland Center for Entrepreneurship, Avril 2014**

*« Nous allons assister à des avancées considérables dans l'industrie manufacturière grâce aux imprimantes 3D, mais le public doit comprendre que toutes ces innovations vont de concert avec d'autres secteurs, comme l'automatisation et le développement logiciel. L'impression 3D est juste l'un des éléments du domaine de la production digitalisée, devenu un terme de substitution du fait de son hypermédiatisation. La plupart des histoires que vous lisez dans les journaux seront probablement vraies un jour, mais il est difficile d'affirmer quand exactement. »*

**Charles Hull, co-fondateur et Vice-Président exécutif, 3D Systems, Mai 2014**

## SOMMAIRE

1. INTRODUCTION .....	7
Décryptage.....	7
Une nouvelle révolution industrielle ? .....	7
Innovation et technologie de rupture .....	8
Production de niche et production de masse .....	9
Variété de production .....	9
Avantages, barrières et challenges.....	10
2. LES TECHNOLOGIES .....	11
2.1. Techniques d'impression 3D .....	11
Stéréolithographie.....	11
Fused Deposition Modeling (FDM).....	11
Impression par jets multiples (Material Jetting) .....	11
Frittage par laser (SLS : Selective Laser Sintering) .....	12
Techniques d'impression : quelques avantages .....	12
2.2. Comment ça marche ?.....	13
3. LES TYPES DE MATERIAUX .....	14
3.1. Plastiques, métaux et céramiques .....	14
Diversité des nouveaux intrants .....	14
Evolution des propriétés .....	14
Aller plus loin, plus haut.....	15
3.2. Coûts des matériaux et segments de marchés.....	15
4. LES MARCHES DE L'IMPRESSION 3D.....	16
4.1. Marchés actuels et futurs .....	16
4.2. Coup de projecteur sur quatre secteurs industriels.....	17
La défense .....	17
L'aéronautique.....	17
L'automobile .....	18
La santé .....	19
4.3. Limites des technologies disponibles.....	20

Coûts et vitesse de production .....	20
Qualité des produits .....	20
Propriété intellectuelle.....	20
4.4. Le marché des particuliers.....	21
Un marché des services en pleine expansion .....	21
Le tournant des imprimantes 3D low-cost.....	21
Côtés pratiques : rechanges et créations.....	22
5. UNE NOUVELLE CHAÎNE DE LA VALEUR PRODUIT .....	23
5.1. Modélisation, partage et open design .....	23
Modélisation et visualisation : une dé-sophistication des procédés .....	23
Nouveaux codes de partage du design .....	24
Crowdfunding .....	24
Le concept d’open design .....	25
5.2. Impacts sur les industries productives.....	26
5.3. Innovations technologiques .....	27
5.4. Une plateforme d’innovation .....	27
6. ECOSYSTEME DE L’IMPRESSION 3D.....	28
6.2. Exemples de fournisseurs de services.....	28
6.2. Principaux producteurs et fournisseurs d’imprimantes .....	29
6.3. La position de la France .....	29
7. POLITIQUE AMERICAINE .....	30
7.1. Contexte : le programme AMP .....	30
7.2. Second round : des pôles d’excellence manufacturière à l’AMP 2.0 .....	31
7.3. LM3I et DMDII .....	32
7. CONCLUSION .....	32
7.1. Mutation du secteur productif traditionnel .....	32
7.2. L’avis des analystes de marchés .....	33
7.3. Nouveau concept à la mode : vers une impression 4D ?.....	34

# 1. INTRODUCTION

## *Décryptage*

Qui aurait pu penser voilà encore deux décennies que les industries traditionnelles productives pourraient un jour fonctionner sans usines ? Depuis la révolution industrielle entreprise au 19<sup>e</sup> siècle, la production de biens est synonyme d'industries lourdes, de machines-outils, de lignes de production et d'économies d'échelle. Il est donc inhabituel de songer à **une production sans outils, sans lignes d'assemblage et sans chaînes de fourniture**. C'est pourtant une tendance en plein essor au fur et à mesure que les techniques d'impression 3D sont développées et utilisées – dans des proportions distinctes et des contextes différents – tout à la fois par les particuliers, les PME-PMI, les centres de recherche et les grands groupes industriels.

Il est aujourd'hui possible de fabriquer des équipements et des objets de toute sorte dans une grande variété de matériaux, directement depuis sa maison ou son lieu de travail. A partir de son ordinateur personnel, tout professionnel ou particulier initié peut créer une représentation digitale de ces objets, ou simplement télécharger en ligne les fichiers de leur représentation tridimensionnelle. Puis, après avoir transmis ce fichier numérique à l'imprimante 3D connectée à l'ordinateur (à l'image des impressions classiques connues de longue date) voir l'objet « prendre forme » sous ses yeux. L'impression 3D n'est plus seulement un rêve de science-fiction ou une technologie de laboratoire, mais une réalité dont le développement s'accélère à mesure que de nouveaux marchés sont conquis.

## *Une nouvelle révolution industrielle ?*

Ce nouveau paradigme soulève la question de l'impact sur les industries traditionnelles et la production de biens et des services associés. Bien sûr, les usines ne vont pas disparaître du jour au lendemain, mais le paysage de l'industrie productive traditionnelle sera transformé avec l'arrivée de nouveaux entrants et de produits innovants, notamment grâce à la combinaison de matériaux autrefois difficiles à travailler. Le journal britannique *The Economist* a qualifié les techniques d'impression 3D de **« nouvelle révolution industrielle », après la mécanisation du XIXe siècle et l'émergence de la production à la chaîne au XXe siècle** [29]. Si l'effet d'annonce est au rendez-vous et le message habilement accrocheur, à mieux y regarder l'impression 3D a effectivement tout d'un secteur de rupture. Des éléments fondamentaux de la chaîne de la valeur manufacturière seront profondément transformés (la distribution de biens par exemple), articulés de manière différente ou bien tout simplement supprimés. Les consommateurs modernes exigent désormais des produits hautement personnalisés, un service rapide et une livraison éclair. La personnalisation et l'immédiateté du service sont économiquement peu rentables avec les procédés de fabrication traditionnels, généralement optimisés pour de larges volumes de pièces identiques produites dans des usines éloignées des points d'achat et de consommation : l'impression 3D change ce paradigme en réorientant la méthode de calcul vers une optimisation par lots de produits.

Les imprimantes 3D ouvrent la voie à l'ultra-personnalisation. De plus, **une unique machine est capable de produire une large gamme de produits**, ces derniers pouvant être directement assemblés à la production : l'impression 3D contrôle en effet précisément la déposition des matériaux et offre la possibilité de créer des structures plus complexes qu'avec des moyens conventionnels. Enfin, l'impression tridimensionnelle permet un possible gain de qualité des produits rarement mise en œuvre par des méthodes traditionnelles à l'endroit de leur utilisation (ce dernier point étant fortement dépendant du type d'imprimante utilisé – principalement industriel - et du produit final désiré).

### *Innovation et technologie de rupture*

L'impression 3D ouvre donc la voie à **une multitude de plateformes locales d'innovation** [30], permettant à la création de biens de se développer dans des endroits traditionnellement peu enclins à la production directe, et engendre une nouvelle génération de DIY (*Do It Yourself*, le mouvement dont le motto se traduit littéralement par *Faites-Le Vous-Même*) : artistes, entrepreneurs, architectes, élèves ou encore enseignants. D'après l'ancien rédacteur en chef du magazine *Wired*, Chris Anderson [31], les techniques d'impression 3D sont des outils de collaboration hors du commun qui vont accélérer les innovations et les ruptures dans le monde matériel et la production, à l'instar d'Internet qui démultiplie l'innovation, les collaborations et les ruptures dans le monde digital [32].

L'impression 3D correspond à la définition des technologies de rupture donnée par le professeur Clayton Christensen de l'université d'Harvard [33-34] : **s'il convient de rester prudent, les techniques mises au point ont la capacité d'être plus simples, moins chères, plus pratiques en matière de taille comme de procédé que les outils de production traditionnels**. Les technologies 3D actuelles sont également assez performantes et économiquement abordables pour pénétrer des marchés qui n'avaient voilà quelques années aucune capacité de production : startups, associations, établissements scolaires, bricoleurs et passionnés (partisans du DIY). En revanche, **il est illusoire de penser qu'un avion de ligne sera à court ou moyen terme entièrement produit, et en série, grâce à l'impression tridimensionnelle**. Les acteurs traditionnels de la production, peu importe leur secteur d'activité, ont donc tout à gagner à surveiller attentivement les évolutions des technologies développées, et à intégrer progressivement ces nouvelles techniques à leurs propres procédés.

La majorité des technologies de rupture commence à se développer en marge des techniques établies : lorsque les premières imprimantes émergèrent il y a plus de deux décennies, la finition des produits manufacturés était bien loin des procédés de production de l'époque. Cependant, comme explicité par le professeur Christensen [34], les technologies innovantes ciblent d'abord les marchés inoccupés par les procédés classiques. L'impression tridimensionnelle trouva le prototypage rapide, un secteur d'activité extrêmement coûteux et exigeant en ressources lorsqu'il repose sur les techniques classiques de production (adaptation des lignes de production, validation des procédés, certifications, etc.) : à l'inverse, **les imprimantes 3D permettent d'obtenir rapidement des prototypes uniques, peu chers et de qualité suffisante** [35].

### *Production de niche et production de masse*

Puis, avec le développement et l'amélioration graduelle des techniques d'impression, les imprimantes 3D ont commencé à pénétrer les marchés de production de niche et des biens de consommation en petits volumes : production de prothèses personnalisées dans le domaine de la santé [13-16], remplacement de pièces vintage dans l'automobile [36].

D'après le professeur Christensen, les technologies de rupture continuent de se développer jusqu'au point où elles peuvent répondre aux besoins du segment les plus hauts du marché à un coût moins important : elles prennent alors le dessus sur les acteurs dominants traditionnels. Ce pourrait être le chemin sur lequel se trouve le secteur de l'impression 3D aujourd'hui : **le secteur évolue rapidement, avec des exemples pratiques dans de nombreuses industries comme la défense, l'aérospatial, l'automobile et les biotechnologies** (une description succincte de ces secteurs est proposée ultérieurement). Si les imprimantes 3D des secteurs industriels sont principalement utilisées pour de faibles volumes de production, la qualité des produits obtenus est au rendez-vous (ces derniers sont plus légers, plus résistants, customisés et déjà assemblés) pour un coût plus faible qu'en faisant appel à des procédés classiques.

Bien sûr, les possibilités actuelles des technologies d'impression 3D les positionnent encore un cran en-dessous des capacités de production des usines modernes et ultra-automatisées, en particulier pour les volumes importants. A très court terme, l'impression tridimensionnelle ne pourra pas produire à l'échelle industrielle des produits manufacturés avec un degré de finition équivalent. Le secteur n'en a pas (encore) l'ambition et se concentre intelligemment sur les nouveaux marchés : au fil du temps, les opportunités de positionnement en complément des moyens de production classiques vont se multiplier. Cela pourra prendre la forme de méthodes plus agiles, de l'émergence de machines hybrides combinant impression tridimensionnelle et techniques de production classiques, d'évolutions profondes des techniques de design ou de la structuration de la chaîne de valeur de production. La compétition dans chaque segment de marché tirera les coûts vers le bas, et les barrières économiques tomberont progressivement.

### *Variété de production*

Une autre caractéristique de rupture du secteur de l'impression 3D est sa grande variété de production, c'est-à-dire **la possibilité d'imprimer une large gamme d'objets**. Cette flexibilité est à comparer aux investissements et aux temps d'arrêts nécessaires sur les chaînes industrielles lorsqu'un nouveau produit doit être lancé en production. Il n'est pas difficile d'imaginer l'usine du futur capable de manufacturer dans les mêmes locaux des ustensiles de cuisine, des composants utilisés dans l'industrie aéronautique et des produits pharmaceutiques grâce à une seule ligne d'imprimantes tridimensionnelles. Ce jour-là, les structures industrielles telles que nous les connaissons auront été fortement impactées : plusieurs étapes de la chaîne de valeur produit auront été drastiquement réduites ou supprimées, notamment la distribution, le stockage et la vente au détail.

Les productions seront moins coûteuses en ressources humaines et moins exigeantes en matière de procédés : l'impression tridimensionnelle permet de **réduire les quantités de matériaux de base et de limiter la production de déchets** tout en assurant légèreté et résistance, du moins au niveau industriel.

Enfin, la personnalisation des produits est assurée, incitant les nouvelles stratégies de production basées sur la collaboration avec le consommateur, notamment par la création de « *co-produits* ».

#### *Avantages, barrières et challenges*

Une série de barrières techniques demeurent : le coût des équipements industriels et des matériaux utilisés comme intrants, la qualité de finition selon les technologies utilisées (c'est en particulier le cas pour le segment des particuliers), la capacité de production et les contraintes liées à la taille des objets produits (il n'est pas possible d'imprimer n'importe quel objet) en sont de bons exemples.

A un niveau plus amont, les barrières économiques et la restructuration des industries productives, **la redistribution engendrée des rôles dans le secteur avec l'arrivée de nouveaux entrants**, la modernisation et le changement des outils à la disposition des industriels devront être particulièrement étudiés, compris et intégrés afin d'assurer une transition souple vers un modèle moderne de production-distribution limitant les impacts sociaux et économiques négatifs.

Avantages théoriques des techniques d'impression 3D
<ul style="list-style-type: none"><li>• Forte personnalisation possible des biens et produits, à bas coût ;</li><li>• Design et production efficace (légèreté, résistance, complexité) ;</li><li>• Variété de production (capacité à produire des biens différents) ;</li><li>• Capacité de production d'objets très petits (échelles macro et nanoscopiques) ;</li><li>• Peu de déchets lors de la fabrication ;</li><li>• Production à la demande, en volumes réduits ;</li><li>• Production locale, proche des lieux de consommation ;</li><li>• Production accessible à tous, peu de barrières à l'entrée ;</li><li>• Fort potentiel d'innovation dans la distribution et la fourniture de services.</li></ul>
Challenges à surmonter pour le secteur
<ul style="list-style-type: none"><li>• Production non compétitive de grands volumes de produits ;</li><li>• Variété encore limitée des matériaux utilisés pour les impressions ;</li><li>• Coût potentiellement élevé des matériaux de base utilisés comme intrants ;</li><li>• Difficulté de combiner plusieurs matériaux (notamment dans l'électronique) ;</li><li>• Impression complexe d'objets de grande taille ;</li><li>• Qualité et durabilité limitées des biens finaux.</li></ul>

**Tableau 1** : Impression 3D : avantages, challenges et opportunités

## 2. LES TECHNOLOGIES

### 2.1. Techniques d'impression 3D

L'ensemble des technologies d'impression tridimensionnelle connues est basé sur **la découpe numérique d'un objet virtuel 3D en lamelles 2D de très fine épaisseur**. Ces fines lamelles sont ensuite déposées physiquement une à une par l'imprimante en les fixant sur les précédentes, ce qui reconstitue l'objet réel. Il existe différents types de technologies, **les plus connues étant la stéréolithographie, le frittage laser et la FDM (*Fused Deposition Modeling*)**.

- *Stéréolithographie*

Le procédé de la stéréolithographie a été mis au point par le fondateur du leader *3D Systems Corp.* Charles Hull dans les années 1980. Les deux formes les plus courantes de la stéréolithographie sont la photopolymérisation (SLA) et le Digital Light Processing (DLP).

Le SLA concentre un rayon ultraviolet dans une cuve remplie de photopolymère (un matériau synthétique dont les molécules se modifient sous l'effet de la lumière, la plupart du temps ultraviolette). Le laser ultraviolet travaille le modèle 3D souhaité couche après couche. Lorsque le rayon frappe la matière, cette dernière se durcit sous son impact tout en se liant aux couches adjacentes. Au sortir de la cuve, on obtient une forme à la résolution remarquable (jusqu'à 30 microns), et la matière non frappée peut être réutilisée. Le DLP utilise des faisceaux plus larges pour projeter les sections de l'objet directement dans la cuve de photopolymère.

- *Fused Deposition Modeling (FDM)*

Le procédé a été inventé par Scott Crump [2], le fondateur de *Stratasys*, à la fin des années 1980. Le FDM consiste à porter à la fusion de petites gouttes de matière plastique qui créent la forme couche après couche. Une fois que la goutte quitte l'aplicateur, elle durcit de manière immédiate tout en se fondant avec les couches inférieures. C'est le procédé de loin le moins coûteux, utilisé dans la grande majorité des imprimantes 3D vendues aux particuliers. L'ABS, les polyesters thermoplastiques comme le PLA et les polymères biodégradables peuvent être travaillés avec ce procédé. Le grain de l'impression se situe en général entre 75 et 300 microns. La plupart des imprimantes 3D grand public utilisent ce procédé notamment celles à l'initiative de RepRap [28] ou vendues par *Solidoodle* [37], *LeapFrog* [38], *MakerBot* [39] ou *Cube* [40]. Une variante existe : le *Plastic Jet Printing* (PJP).

- *Impression par jets multiples (Material Jetting)*

Le principe de ces imprimantes par jets multiples est assez proche de celui d'une imprimante 2D classique : les buses utilisées sont d'ailleurs identiques aux imprimantes de bureau. C'est l'empilement de ces couches qui crée un volume. La pièce est réalisée généralement par dépose de gouttes de résine thermodurcissable (acrylique, polypropylènes, cire, ...) qui est réticulée couche par couche par une lampe UV.

Afin de maintenir la pièce, un support est créé en même temps que la pièce, mais en cire. La cire est ensuite fondue à l'étuve pour obtenir une pièce finale avec une précision allant jusqu'à 0,016 mm.

- *Frittage par laser (SLS : Selective Laser Sintering)*

On attribue l'invention de ce procédé à Carl Deckard et Joe Beamanand, chercheurs à l'Université d'Austin, au milieu des années 1980. La technique de frittage la plus courante est appelée SLS, pour *Selective Laser Sintering*. Cette technologie est proche de la stéréolithographie mais sans la cuve remplie de polymère. Des matières dures (sous forme de poudre) comme le polystyrène, le verre, le nylon, certains métaux (dont le titane, l'acier ou l'argent) ou de la céramique sont frappées par un laser. Là où le laser frappe, la poudre s'assemble pour créer la forme. Toute la poudre non frappée peut être réutilisée pour les prochains objets. Des variantes de cette technique existent, qui peuvent être classées dans la famille « fusion sur lit de poudre » : *Electron Beam Melting*, *Selective Heat Sintering* ou encore *Selective Laser Melting* [41].

D'autres procédés continuent d'émerger, généralement des combinaisons ou des adaptations des techniques décrites ci-dessus, et les innovations continuent de se multiplier.

#### *Techniques d'impression : quelques avantages*

Pour de faibles volumes, l'impression 3D fournit déjà une valeur ajoutée significative. Les temps et coûts de développement sont fortement réduits en supprimant complètement ou en minimisant le nombre d'outils nécessaires dans les systèmes classiques de fabrication. L'impression tridimensionnelle permet un contrôle très précis du matériau travaillé : les designers, scientifiques et ingénieurs ont ainsi **l'opportunité d'optimiser la structure intérieure des objets imprimés** pour obtenir l'effet escompté. Par exemple, une structure en nid d'abeille dans un objet rectangulaire permet d'alléger ce dernier sans sacrifier sa résistance [42].

Les technologies modernes d'impression 3D permettent également de **réduire drastiquement la quantité de déchets produits par les procédés manufacturiers traditionnels**, qui peuvent aller jusqu'à 90% du volume total du matériau de découpe. La société *Thoqus Products*, basée près de Cleveland et spécialisée dans les moules à injection de matière plastique, affirme notamment que pour l'une de ses gammes de produits phares (bras de robots automatisés), l'impression 3D a permis de diminuer le coût de production par unité de 10,000 à 600 dollars, le temps de fabrication de quatre semaines à une journée, et le poids du produit de 70 à 90% [43-44].

Enfin, les objets peuvent être imprimés avec **un plus grand degré de contrôle spatial**. Cela permet de créer des composants mobiles et des structures internes extrêmement complexes en une seule impression. D'un point de vue plus amont, cette quasi-absence de limites spatiales libère les designers et les artistes des contraintes traditionnelles de la production moderne, stimulant la créativité et l'innovation [45].

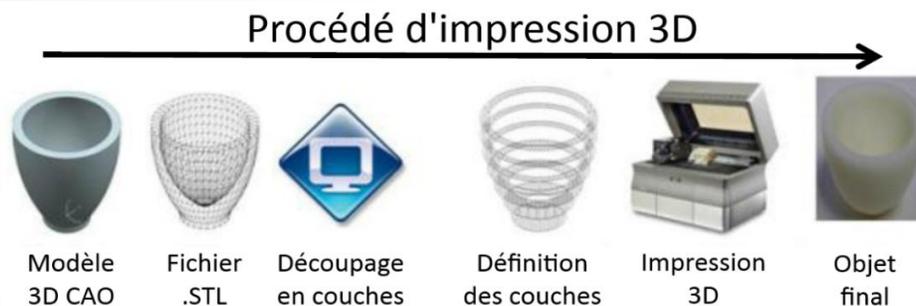
## 2.2. Comment ça marche ?

L'objectif fondamental d'une imprimante 3D est de transformer rapidement une idée en objet réel. Cette idée est d'abord **consignée sous un modèle informatique 3D créé par des logiciels en CAO 3D tels que SolidWorks, Autodesk, Inventor ou Pro/ENGINEER**. Il existe de nombreux logiciels de CAO capables de produire des fichiers 3D : *3D Studio Max, MicroStation, Mimics, AutoCAD, Raindrop GeoMagic, Bentley Triforma, RapidForm, Blender, RasMol, CATIA, COSMOS, Rhinoceros®, SketchUp, Inventor Solid Edge, LightWave 3D* ou encore *VectorWorks* [46].

Tous ces outils logiciels exportent des modèles 3D sous forme de fichiers aux formats standards pour des imprimantes en 3D, les plus courants étant les formats suivants : .STL, .WRL (VRML), .PLY, .3DS et .ZPR. **Notons que les fichiers .STL tendent à s'imposer et pourraient devenir la norme**. Le fichier exporté est un maillage constitué d'une série de triangles orientés dans l'espace, lesquels déterminent un volume en 3D. Ce maillage doit être fermé pour être considéré comme un solide et pas seulement un ensemble de surfaces sans épaisseur. En d'autres termes, à ce stade, la création doit être prête à passer dans le monde réel, non plus seulement sur un ordinateur.

Le fichier .STL est lu par un logiciel spécialisé d'impression 3D fourni avec l'imprimante (des versions open-source existent). L'utilisateur peut alors modifier le fichier qu'il souhaite imprimer, orienter par exemple l'élément dans la chambre de construction ou piloter l'imprimante 3D afin d'imprimer plusieurs versions de l'élément. Le logiciel d'impression 3D découpe en tranches le fichier du modèle 3D sous forme de centaines de coupes transverses numériques. **Le grain est déterminé selon les caractéristiques de l'imprimante et l'aspect désiré de l'objet final** : 0,1 mm peut être considéré comme un grain moyen sur les imprimantes grand public.

Chaque tranche de 0,1 mm correspond à une section du modèle à fabriquer. Une fois l'impression lancée, **les sections du futur objet sont envoyées une à une à l'imprimante 3D qui commence la construction immédiatement**. La machine imprime séquentiellement chaque couche, l'une au-dessus de l'autre, construisant ainsi un objet réel à l'intérieur de la chambre de construction de la machine. Une fois que l'imprimante 3D termine la dernière couche, un cycle de séchage court commence. Puis l'objet réel peut-être retiré, et potentiellement subir un traitement de finition si nécessaire (ponçage, cuisson pour la dureté, etc.).



**Figure 1** : Le procédé d'impression 3D en quelques étapes simplifiées

### 3. LES TYPES DE MATERIAUX

#### 3.1. Pastiques, métaux et céramiques

L'industrie de l'impression tridimensionnelle est surtout connue pour l'utilisation de matières plastiques, mais **il existe un nombre croissant de matériaux pouvant être utilisés, comme les céramiques, le verre ou même les tissus vivants**. Les imprimantes 3D destinées aux particuliers et aux professionnels permettent de produire des objets et pièces se cantonnant majoritairement aux métaux et plastiques. Nous l'avons explicité précédemment, il existe deux grandes techniques d'impression : soit un intrant fondu (plastique, métal) est extrudé au travers d'une fine aiguille à injection sur un support sur lequel il se solidifie, soit un lit de matériau en poudre est solidifié couche par couche de manière sélective. Un travail de postproduction est quelquefois nécessaire, par exemple le nettoyage de poudre en excès, une cuisson supplémentaire pour assurer la dureté ou la résistance souhaitée d'un matériau, ou la dissolution en solution de la structure de support.

##### *Diversité des nouveaux intrants*

Amateurs, associations de bricoleurs comme scientifiques ont adapté les méthodes d'impression existantes pour **élargir de manière spectaculaire les types de matériaux utilisables comme intrants**. Il est désormais possible d'imprimer du chocolat avec *Choc Edge* [47] ou le géant *Hershey's* [48], qui s'est associé avec le leader *3D Systems*. Dans le domaine de la santé, les supports pour la croissance osseuse se sont multipliés [49-50] depuis les nombreux articles publiés en 2011 par une équipe de recherche de la *Washington State University* [51], tandis que l'impression directe de médicaments semble à portée de main [52-54]. La société *Organovo* crée des tissus humains [55], d'abord rendue célèbre pour l'impression d'une veine en 2010 [56] puis d'un foie en 2013 [57].

##### *Evolution des propriétés*

Les avancées dans le domaine de la recherche révèlent comment les techniques d'impression 3D peuvent **révolutionner les propriétés des produits**. De la même manière que le contreplaqué a longtemps été utilisé comme un matériau de substitution plus léger, plus résistant et plus flexible que d'autres bois plus classiques, les pièces produites par les imprimantes 3D peuvent révéler des propriétés étonnantes.

Ainsi, les scientifiques à travers le monde travaillent sur des gammes de procédés permettant un contrôle accru des propriétés matérielles (physiques, mécaniques et électriques) des composants imprimés, notamment en surveillant la manière dont les structures moléculaires sont agencées lors de l'impression. Un exemple parlant est l'impression tridimensionnelle du métal permettant d'obtenir des microstructures uniformes grâce à une solidification plus rapide (par opposition à la fonte et la forge classiques qui impliquent que le métal se refroidisse lentement de l'extérieur jusqu'au cœur de la pièce). Cela permet aux scientifiques et ingénieurs de contrôler la solidité, la résistance, la flexibilité et l'élasticité des métaux, offrant la possibilité d'une combinaison de propriétés qui n'était que rêvée il y a encore quelques années.

## *Aller plus loin, plus haut*

Dans un autre registre, les chercheurs du MIT cherchent à copier les propriétés des structures naturelles, dans l'optique notamment d'imprimer des bétons innovants [58]. Le *MIT Media Lab* s'est essayé à l'impression de banches en polyuréthane, qui offrent les bénéfices du poids, d'un temps de séchage réduit, du contrôle et de la stabilité par rapport aux banches en béton classiques : la mousse de polyuréthane joue le rôle d'isolant [59]. D'autres équipes travaillent à l'impression d'un bâtiment complet [60-61]. Quelques sociétés comme *Contour Crafting* proposent déjà d'imprimer des maisons et abris sur demande, en privilégiant pour commencer les abris à bas coût nécessaires en urgence suite à une catastrophe naturelle [62]. La société affirme qu'une maison de 200 mètres carrés peut être construite en moins de 20 heures.

### **3.2. Coûts des matériaux et segments de marchés**

Le coût des matériaux utilisés reste encore un frein de développement aux techniques d'impression tridimensionnelle. A titre d'exemple, **la gamme de prix du plastique utilisé dans la plupart des imprimantes s'étire de 20 à plus de 100 dollars par kilogramme**, tandis qu'un plastique équivalent utilisé dans un procédé classique de moulage par injection est autour de 3 \$/kg [63]. Si l'important surcoût constaté est absorbable pour les petites productions, l'impression 3D reste difficilement compétitive pour les productions de série. Pour certains matériaux en revanche, l'impression 3D est bien plus qu'une niche, c'est la technique de production idéale.

Le titane est un parfait exemple : métal idéal pour de nombreuses applications, il est léger, plus dense que l'acier et bien mieux résistant à la corrosion. Son coût actuel très élevé le cantonne à des utilisations dans les secteurs de l'aéronautique, des implants médicaux, de la bijouterie et des voitures de compétition ou de luxe. En dépit de ses qualités, c'est un métal difficile à travailler. Le titane a tendance à se durcir pendant la coupe (impactant la durée de vie des équipements utilisés pendant le processus) et les risques de contamination lors des soudures sont très élevés. Cela impose des conditions de travail très strictes. C'est ici que l'impression 3D se distingue comme une parfaite solution de secours, supprimant les problématiques de travail et de soudure.

Afin de s'attaquer au prix élevé du titane – environ 50 fois plus cher que l'acier – industriels et centres de recherche étudient des procédés permettant de créer de la poudre à moindre coût. Aujourd'hui, cette dernière est encore produite en écrasant des lingots de métal afin d'obtenir le produit escompté : de la même manière que le procédé de Bayer [64] a réduit à la fin du XVIIIe siècle le coût de l'aluminium de 1600 \$/kg à 0,60 \$/kg, les recherches se concentrent sur une solution pour produire de la poudre de titane à une fraction du coût actuel. En décembre 2013, la société britannique *Metalysis* [65-66] annonce avoir mis au point un nouveau procédé permettant de réduire les coûts de production de près de 75% : une usine de production de poudre devrait voir le jour prochainement, une série d'investisseurs ont fait part de leur fort intérêt [67].

## 4. LES MARCHES DE L'IMPRESSION 3D

### 4.1. Marchés actuels et futurs

Le **prototypage de nouveaux produits** est l'application commerciale la plus développée à l'heure actuelle, **couvrant près de 70% du marché total de l'impression tridimensionnel**. Le prototypage 3D fournit aux designers, ingénieurs et même aux consommateurs un moyen idéal de première production d'objets fonctionnels, afin de manier et tester les produits. Les imprimantes donnent ainsi vie aux concepts et aux créations très en amont dans le cycle de design. En matière de gain de temps et d'économie, c'est une avancée majeure : cela **évite d'importants investissements nécessaires à la production des premières séries**, et de modifications coûteuses a posteriori en cas d'erreur de design, etc. Lorsqu'il est question d'introduire rapidement un produit sur le marché (là où l'on sait que l'exécution est bien souvent aussi importante que le concept, en particulier sur le marché américain), c'est un avantage compétitif considérable.

En permettant l'impression rapide de multiples prototypes, les industriels ont la possibilité de réduire fortement leur cycle de développement. Quelques exemples consultables sur le site du leader *Stratasys* : l'industriel japonais *Akaishi* – fournisseur de produits de rééducation - a réduit le temps de mise sur le marché de sa gamme de 90% grâce à l'impression 3D [68]. Dans un autre registre, *Bell Helicopter* teste ses nouveaux designs en quelques jours au lieu de semaines [69]. Dans certains secteurs, l'impression 3D s'est progressivement tournée du prototypage vers la production d'outils et de pièces, **des productions de petit volume estampillées production digitale directe (*Direct Digital Manufacturing*)**. C'est notamment le cas de l'aéronautique, et les exemples fleurissent : l'un des principaux fournisseurs d'hélicoptères *MD Helicopters* a annoncé début 2014 la production d'un nouveau modèle ultra-allégé grâce à l'impression tridimensionnelle [70]. Les technologies 3D appliquées aux volumes restreints de productions conquièrent de nombreux secteurs, ne nécessitant aucun outil, offrant flexibilité et pénétration accélérée sur le marché.

D'un point de vue plus macro, cela permet à des **nations aux capitaux intellectuels très importants mais aux coûts de production plus élevés d'être à nouveau compétitifs sur la scène internationale**. Le secteur de l'impression 3D est par exemple un élément clé de la politique de réindustrialisation américaine (voir *Partie 7*), et l'état fédéral ne s'y est pas trompé en allouant plusieurs dizaines de millions de dollars à de nouveaux hubs sur les thématiques de l'usine du futur et de l'impression 3D [71]. Le département de la défense américaine a ainsi accordé 70 millions de dollars à l'institut *Digital Lab for Manufacturing* [72] près de Chicago, et 70 millions supplémentaires pour le centre *Lightweight and Modern Metals Manufacturing Innovation* [73] de Détroit. Et cette philosophie a déjà ses adeptes : la société 3DE produit des instruments chirurgicaux de haute précision et utilise désormais un service d'impression 3D présent sur le territoire national. Son argument : le coût de production local grâce à ce service est beaucoup plus faible que l'ensemble des coûts de production et de transport si les instruments étaient produits en Asie [74]. L'impression 3D est donc aujourd'hui utilisée essentiellement pour le prototypage et la production en petites séries, notamment dans quatre domaines clés : *la défense, l'aérospatial, l'automobile et la santé*.

## 4.2. Coup de projecteur sur quatre secteurs industriels

### La défense

De nombreux équipements militaires doivent conjuguer solidité, fiabilité et résistance aux conditions extrêmes : de leur fiabilité peut dépendre des vies. *EIOR Technology*, l'une des principales sociétés privées de défense américaine, produit désormais des supports pour ses tanks et ses véhicules de combat par impression 3D [75]. Ces éléments de haute-précision sont montés sur la surface extérieure des véhicules et doivent pouvoir supporter d'importantes vibrations. L'intérêt est avant tout économique, la société a réussi le pari de diminuer le coût de production de 100 000 dollars à moins de 40 000 dollars par série.

Il est aisé d'imaginer des militaires américains imprimant dans quelques années des pièces de rechange sur leur terrain de déploiement, même si l'on est encore loin de cette réalité. *General Electric* a annoncé produire des séries de valves pour avions de chasse par impression tridimensionnelle, tandis que *Lockheed Martin* s'est associé avec le fournisseur *Sciaky* pour mettre au point des pièces – non certifiées – du chasseur F-35 [76-77]. D'après le gouvernement américain, les techniques d'impression 3D – toujours en combinaison avec les procédés classiques de fabrication – ont permis d'économiser près de 4 millions de dollars sur cinq ans (2007-2012), sans mentionner l'amélioration des conditions d'entraînement incluant la défense aérienne, les systèmes de télécommunication et les possibilités médicales. Bien sûr, ces 4 millions sont à mettre en perspective avec les milliards de dollars annuels du budget de la défense aux Etats-Unis.

Un autre exemple : la création de modèles topographiques afin de fournir une intelligence accrue aux troupes déployées au sol. Ce fût le cas pour l'ouragan Katrina où le corps des ingénieurs a imprimé de vastes modèles de la ville de *La Nouvelle Orléans*, créés en moins de deux heures, afin de regarder de près les mouvements changeants des niveaux des inondations [78]. Ils aidèrent à comprendre la situation en cours et à guider les efforts des soldats et des autorités au fur et à mesure que la situation évoluait. La méthode peut être utile dans bien d'autres domaines, du secteur minier à l'archéologie. Les innovations se multiplient également sur les drones, où les certifications et les normes de sécurité sont moins strictes : dernièrement, une équipe de recherche de l'université de Sheffield a mis au point un drone capable d'être imprimé et mis en service en moins de 24 heures [79]. En avril 2014, le premier porte-avions américain *USS Essex* a installé à son bord une imprimante 3D, plutôt pour imprimer des pièces de rechange et des prototypes que pour produire de réelles pièces d'avions [80]. Comme le répètent les officiers de bord, **l'impression 3D n'en est qu'à ses prémises.**

### L'aéronautique

A l'image de la défense, le secteur de l'aéronautique compte bien s'appuyer sur l'impression 3D pour améliorer la performance de ses productions, réduire ses besoins de maintenance, obtenir lorsque possible des éléments plus résistants et faire des **économies substantielles de carburant grâce à des composants plus légers** [81]. *General Electric* a acquis fin 2012 *Morris Technologies*, une société spécialisée dans les techniques avancées de fabrication comme l'impression 3D [82]. *Pratt & Whitney* investit plusieurs millions de dollars dans un centre utilisant les procédés de production additive en

partenariat avec l'université du Connecticut [83]. Boeing, l'un des pionniers de l'impression 3D, qui possède de surcroît un grand nombre de brevets stratégiques dans le domaine, a déjà imprimé plus de 22 000 composants qui sont utilisés aujourd'hui dans un large panel d'appareils différents [84]. Ainsi, Boeing a utilisé des imprimantes 3D pour produire des gaines dédiées aux environnements contrôlés pour son modèle 787. Avec les techniques traditionnelles, les gaines de ce type sont produites avec plus de 20 parties différentes en raison de la complexité de leur structure interne : les techniques d'impression 3D permettent, elles, de produire la pièce en un seul passage. Le nouveau procédé réduit les besoins d'inventaire et de logistique, ne nécessite pas d'assemblage et améliore les temps d'inspection et de maintenance. Les pièces imprimées en 3D pesant moins lourds, le poids d'opération de l'avion diminue, résultant en des économies non négligeables de carburant. D'après *American Airlines*, pour tout pound économisé, c'est 11 000 gallons de fuel qui ne sont pas consommés. Boeing, tout comme d'autres géants de l'aéronautique comme *General Electric* et *EADS*, poursuit donc les recherches pour optimiser la production de pièces spéciales grâce aux imprimantes 3D : **Boeing envisage même d'imprimer une aile complète d'avion** [85].

Un autre avantage est d'utiliser les moyens de production distribués afin d'optimiser les chaînes d'approvisionnement. Les composants produits à la chaîne et en volume important à un endroit du monde peuvent mettre des semaines à atteindre leur usine d'assemblage. Nous l'avons vu, les composants produits sur site grâce aux imprimantes 3D suppriment les temps de livraison ainsi que plusieurs niveaux d'inventaires au niveau de l'usine d'assemblage. Un exemple parfait de chaîne d'approvisionnement complexe est celui du secteur spatial : imaginons qu'il soit possible d'imprimer des produits, des outils ou des pièces de remplacement directement dans la station spatiale internationale (ISS) ou sur Mars. C'est exactement l'objet des travaux de groupes comme *Made in Space* [86]. La société développe des outils, des procédés et des systèmes pour produire directement dans l'espace, permettant ainsi d'éviter les coûts et les cycles de développement très longs nécessaires à l'envoi d'une fusée emmenant les pièces et les outils nécessaires. *Made in Space* est en contrat avec la NASA, et devrait faire ses premiers essais à bord d'ISS prochainement. Un récent rapport du *National Research Council* **a néanmoins fortement relativisé l'apport de l'impression tridimensionnelle à la conquête spatiale** [87]. L'Agence Spatiale Européenne (ESA) a elle-aussi des projets similaires, en se concentrant sur une base lunaire [88].

### L'automobile

Les principaux constructeurs utilisent depuis des années l'impression 3D pour le prototypage de pièces. L'industrie automobile sera à court terme l'un des secteurs les plus réactifs et devrait intégrer l'impression 3D pour les productions de faible volume. Prenons l'exemple d'*Urbee*, l'une des premières voitures « imprimées ». Créée par *KOR EcoLogic* [89], le développement de ce premier véhicule étiqueté 3D a permis de montrer que de nombreuses barrières présumées concernant la taille des objets imprimés pouvaient être levées. Nous sommes aujourd'hui à la version 2 d'*Urbee*, dont le défi principal est de traverser les Etats-Unis avec moins de 10 gallons d'essence [90]. Si l'ensemble de la version 1 n'était pas totalement imprimé (principalement le squelette principal), la plupart des composants internes de la version 2 devrait être mise en production 3D. L'*Urbee* pourrait être l'un des premiers véhicules mis en production tridimensionnelle en petite série en 2014.

Il est probable que différents types de véhicules aux designs les plus divers se multiplient dans un futur proche. Les ingénieurs de BMW utilisent eux l'impression 3D pour créer des versions plus ergonomiques et légères de leurs outils de production, afin d'augmenter la productivité des employés. En améliorant le design, les ouvriers portent près d'un kilogramme et demi de moins et ont largement amélioré leur équilibre. Il y a peu, BMW a fourni à ses employés des pouces en plastique permettant un meilleur confort de travail [91].

Un autre métier où l'impression 3D peut faire une différence conséquente est le marketing. Imaginons une seule minute présenter un design grâce à une maquette 3D plutôt que sur un plan papier : une société a déjà utilisé cette méthode pour le design d'intérieur de voitures. Si une image vaut bien mieux qu'une explication, une maquette rend le projet encore plus réaliste.

### La santé

Un grand nombre des **exemples les plus prometteurs et innovants sont ceux du domaine de la santé**, dans lequel l'impression tridimensionnelle a le potentiel de sauver des vies, ou a minima de soulager de nombreux patients. L'impression 3D dans le secteur de la santé a encore quelques belles années devant elle avant de valider son adoption de masse, mais les premiers résultats ayant permis de créer des tissus, des os ou, dans un autre registre, des prothèses sur mesure, sont suffisants pour appréhender l'énorme potentiel pour le public. En utilisant les cellules souches de volontaires, le *Wake Forest Institute for Regenerative Medicine* a par exemple développé **des techniques d'impression 3D permettant de créer des tissus** – afin par exemple de réparer des tissus brûlés - voire des organes complets [92-93]. Le but ultime est de pallier le déficit d'organes pouvant être transplantés. Les scientifiques travaillent sur une grande variété de projets, comme celle de l'impression d'une oreille [94], d'un muscle ou encore d'un rein [95]. Les imprimantes utilisent des données en provenance de scanners et d'IRM. L'idée de base est d'imprimer des cellules vivantes (et les biomatériaux qui permettent de lier les cellules) en une forme en trois dimensions : l'organe ou le tissu est ainsi implanté dans le corps humain, où il doit continuer à se développer.

Le *Walter Reed Army Medical Center* crée et implante des plaques crâniennes en titane, notamment pour les militaires blessés [96]. Des mâchoires ont également été imprimées pour de grands accidentés : les **implants sur mesure sont produits rapidement selon la physiologie du patient**, ce qui réduit considérablement les temps de chirurgie et les risques d'infection. Cette capacité à produire du sur-mesure est un élément fondamental dans le domaine des prothèses. L'impression 3D est idéale pour ces petites productions hautement personnalisées qui requièrent des matériaux légers mais solides.

*Bespoke Innovations* [97], une société rachetée par *3D Systems Corp.*, utilise les technologies d'impression tridimensionnelle pour faire des couvertures personnalisées de poumons artificiels et ambitionne d'imprimer la totalité de la prothèse à terme. Un autre très bon exemple est celui des appareils auditifs personnalisés qui, bien que relativement chers, offrent aux patients une qualité de son excellente [98].

### 4.3. Limites des technologies industrielles disponibles

#### *Coûts et vitesse de production*

Les technologies industrielles d'impression 3D sont aujourd'hui toujours plus chères que les techniques classiques et/ou alternatives. Les imprimantes, notamment celles utilisées dans les secteurs de l'aéronautique et la défense, et en particulier celles permettant de produire des pièces métalliques, représentent un coût élevé à l'investissement. Par exemple, les **imprimantes à frittage laser pour le métal peuvent coûter de 500 000 à plusieurs millions de dollars** chacune. Ce sont également des machines-outils complexes à mettre en œuvre selon leurs principes de fonctionnement (chambres sous vide ou remplies de gaz) et leurs logiciels de contrôle ultra-spécialisés. **Les imprimantes 3D sont également plus lentes que les alternatives actuelles.** Cela prend des milliers de gouttes de métal pour créer une seule couche, et la production de pièces nécessite plusieurs heures à plusieurs jours. Enfin, nous l'avons vu précédemment, les poudres de métaux sont jusqu'à 30 fois plus chères (en poids) que l'équivalent de matière brute. Ces coûts devraient bien sûr baisser avec le temps et le volume de production, mais il restera des limites physiques comme la vitesse du frittage laser qui, à terme, devrait déterminer le coût final de l'impression 3D.

#### *Qualité des produits*

La qualité des produits est le talon d'Achille de toutes les techniques de production. Les technologies de frittage laser principalement utilisées dans l'industrie se sont fortement améliorées, mais **les pièces obtenues présentent des microfissures dues au stress matériel.** Les fournisseurs de technologies 3D continuent en permanence d'améliorer la qualité de déposition de la technologie, mais le résultat ne devrait jamais être parfaitement exempt de microfissures, pouvant potentiellement limiter l'utilisation de certaines pièces pour des usages où d'extrêmes contraintes sont appliquées (domaine spatial par exemple). Le frittage par faisceau d'électrons émerge comme une alternative de meilleure qualité. L'importante densité énergétique des faisceaux d'électrons permet d'obtenir des pièces très denses : la technologie est de plus en plus utilisée pour produire et réparer les pales de turbine.

#### *Propriété intellectuelle*

En théorie, **le vol de propriété intellectuelle peut représenter une menace.** Des faussaires peuvent tout à fait faire de la rétroingénierie en s'appuyant sur des scanners et des imprimantes 3D sans apporter de contribution financière aux propriétaires des produits visés. Bien que possible, le risque de vol de propriété intellectuelle dans des domaines comme l'aéronautique ou la défense sont malgré tout minimisés par les coûts économiques de l'impression. A la différence de la musique ou des films, le coût marginal de l'impression 3D industrielle n'est pas négligeable, et le marché disponible est restreint et relativement sophistiqué. Bien que possible, l'utilisation des technologies de reproduction 3D pour contrefaire ne serait guère plus pratique que d'utiliser les techniques classiques disponibles. En revanche, les industriels spécialisés ont tout intérêt à réévaluer régulièrement leurs stratégies de production et de protection suivant les évolutions du secteur [99].

#### 4.4. Le marché des particuliers

Le développement de l'impression 3D a créé une nouvelle génération de *Do It Yourself*, d'artisans, d'amateurs et de passionnés. C'est même un nouveau paradigme qui émerge pour cette population de convaincus. En utilisant les services d'impression 3D à leur disposition - soit directement grâce à leurs propres imprimantes 3D *low-cost*, soit en ligne en s'appuyant sur la multitude de services à disposition - le potentiel de création est immense.

##### *Un marché des services en pleine expansion*

Le développement des imprimantes 3D constitue un **formidable levier économique qui répond à la soif croissante de personnalisation du monde moderne**. De la coque de portable entièrement personnalisée à l'avatar de la série télévisée à la mode en passant par le robot-jouet en kit, il existe aujourd'hui une large gamme de services 3D en ligne à la disposition des consommateurs tel *Freshfiber* [100], *FigurePrints* [101], *My Robot Nation* (acquis par *3D Systems Corp*) [102] et *Sculpteo* [103]. C'est la mode du « As-a-Service », c'est-à-dire ici de services d'impression disponibles en continu. Il est d'ailleurs fort probable que **des boutiques d'impression 3D apparaissent à moyen terme** dans les centres commerciaux, aux Etats-Unis et en Europe. Une population de plus en plus importante de designers utilise ces services pour créer, charger et échanger des produits en ligne sur des sites internet comme *Shapeways*, une startup qui travaille à la « démocratisation de la créativité en rendant les productions individuelles plus accessibles » [104].

##### *Le tournant des imprimantes 3D low-cost*

Les années 2008 et 2009 ont marqué un tournant dans le secteur de l'impression tridimensionnelle avec **l'émergence puis la dissémination d'imprimantes 3D open-source en kit** pour un prix inférieur à 1000 dollars l'unité. Ces produits ont particulièrement profité de l'apport de deux projets dits « ouverts » (*open source*): l'imprimante 3D *RepRap* [28] et le projet *CupCake CNC* de la société *MakerBot Industries* [99]. Ces équipements abordables ont rapidement pénétré le segment des passionnés et des amateurs, qui auparavant étaient incapables de s'offrir des équipements similaires. Comme beaucoup de technologies émergentes, les prix continuent de diminuer. En 2012, l'imprimante *Printrbot* [105] est lancée pour 549 dollars. Aujourd'hui, on peut trouver sur Kickstarter des projets d'imprimantes 3D affichant des prix aussi bas que 100 dollars l'unité (c'est le cas de l'imprimante « Peachy Printer » [106]). Cette nouvelle accessibilité des imprimantes 3D a poussé de nombreux consommateurs à court-circuiter les étapes classiques de la chaîne de valeur produit. De plus, grâce à leur ancrage *open source*, ces imprimantes bénéficient d'un écosystème propice à l'innovation et se développent technologiquement aussi rapidement que d'autres imprimantes exclusivement destinées aux professionnels.

Ceux qui ont besoin d'un meilleur rendu ou d'une qualité particulière, un nombre croissant de bureaux d'impression en ligne proposent d'imprimer les produits sur différents matériaux (métaux, plastiques et verres) et les faire parvenir aux consommateurs par voie postale.

La plateforme *Thingiverse* [107] est un très bon exemple de site rassemblant une riche communauté de DIY amateurs et professionnels qui échangent leurs productions (en particulier les fichiers CAD associés). Créé par *MakerBot Industries*, le site internet se caractérise par une large communauté d'individus ayant développé **plus de 25 000 modèles 3D allant des jouets aux pièces de rechange en passant par les œuvres d'art**. Tous les fichiers sont disponibles au téléchargement et imprimables par quiconque contre rémunération.

Au-delà du segment des particuliers, les imprimantes *low-cost* sont désormais utilisées dans différents contextes. Les écoles par exemple [108-109], où les professeurs de technologie industrielle utilisent l'impression tridimensionnelle pour enseigner à leurs étudiants les concepts de design et les particularités des modèles physiques. Les municipalités également, puisque de plus en plus d'imprimantes 3D sont installées dans les bibliothèques afin que les citoyens puissent manipuler et comprendre la technologie, et bien sûr s'en servir pour des projets personnels. Il est important de noter que les exigences de qualité des particuliers sont souvent moindres que celles des industriels : la plupart des consommateurs, notamment en raison de la nouveauté du service, sont relativement prêts à pardonner des défauts sur des objets qu'ils ont créés et imprimés. Il est beaucoup moins acquis qu'ils pardonnent ces défauts sur des objets qu'ils ont achetés, surtout si l'investissement est important.

#### *Côtés pratiques : pièces de rechange et créations*

Même si cela ne concerne pas tous les segments de consommateurs, les imprimantes 3D offrent l'opportunité au particulier d'être maître de ses équipements (notamment ménagers), et donc de pouvoir y apporter des réparations selon son bon vouloir. La foule de pièces de rechange disponibles sur la plateforme *Thingiverse* [107] en est le meilleur exemple : hélices de lave-vaisselle, supports de clavier ou clapets de batteries pour appareil photo, les objets les plus variés peuvent être envoyés à l'impression. Certaines pièces ont un nombre révélateur de téléchargements : un stylet pour Nintendo DS a par exemple été téléchargé et imprimé plus de 400 fois [110], cela illustre bien la résolution simple d'un problème commun. En-dehors de remplacements dits « ordinaires », l'impression 3D offre **l'opportunité de subvenir aux besoins de pièces dont la production a été arrêtée ou les stocks sont épuisés** : la possibilité de créer très rapidement des objets fonctionnels est un avantage majeur. Les passionnés de voitures anciennes et de collection s'en servent pour réparer de vieux modèles, mettre au point des flexibles, des pièces de carrosserie, remplaçant les pièces métalliques par du plastique lorsque possible.

L'impression tridimensionnelle supprime donc une série de verrous caractéristiques de l'industrie manufacturière traditionnelle. S'il est difficile de prévoir le développement ultime de l'impression 3D à court terme et sa pénétration dans les foyers, il est à parier que les consommateurs ne vont pas utiliser les technologies 3D pour recréer ce qu'ils peuvent déjà acheter en magasin. Leurs premières cibles seront les objets qu'ils ne peuvent pas se procurer facilement, comme des pièces de rechange introuvables, des objets hautement personnalisés ou des gadgets.

## 5. UNE NOUVELLE CHAÎNE DE LA VALEUR PRODUIT

### 5.1. Modélisation, partage et *open design*

Le secteur de l'impression 3D semble en bonne voie pour accélérer la démocratisation accélérée de l'industrie manufacturière [34, 111-112]. La création de prototypes a longtemps requis une machinerie chère et un investissement dans des logiciels sophistiqués de CAO. Une barrière économique évidente était donc constatée, la plupart du temps doublée d'une barrière de compétences (maîtrise des logiciels), empêchant de nombreuses bonnes idées de voir le jour : créateurs et entrepreneurs amateurs ont rarement les ressources financières pour designer, manufacturer et distribuer un produit. Depuis quelques années, ces barrières traditionnelles tendent à s'estomper. **La chaîne de valeur de l'impression 3D intègre désormais des outils de scannage et de modélisation *low-costs*** (voire gratuits !) utilisés pour le design, des sites d'échange et de partage (pour le marketing et la distribution), d'investissement collaboratif (pour le financement, notamment au travers du *crowdfunding* [113]) et une nouvelle philosophie dite de *design ouvert* (on parle d'*open design* [114-115] très utile notamment pour les collaborations industrielles). Ces éléments permettent désormais à tous les individus de designer, créer et produire plus aisément.

#### *Modélisation et visualisation : une dé-sophistication des procédés*

La modélisation et la visualisation d'un produit jouent un rôle essentiel dans les premières phases de son développement. Les logiciels permettant d'effectuer ce travail ont longtemps constitué un investissement non négligeable, et des ordinateurs puissants – du moins pour l'époque - étaient nécessaires, ajoutant un capital supplémentaire. Aujourd'hui, le paradigme de la modélisation est profondément transformé : la grande majorité des ordinateurs grand public permet de faire tourner des logiciels sophistiqués comme *Solidworks* [116] ou *Creo 2.0* (et bientôt 3.0) [117]. Un grand nombre de logiciels *low-cost* ou gratuits (car *open source*) voient également le jour. *3DTin* [118], *SketchUp* [119] ou encore *Blender* [120] permettent d'effectuer des travaux de design avancés tout en assurant facilité d'utilisation et réelle ergonomie. *Tinkercad* [121] a lui aussi fait de nombreux adeptes, permettant à tout un chacun de s'amuser avec les bases de la modélisation 3D. Les acteurs français ne sont pas en reste, et des startups comme 3D Slash [122] émergent.

Transformant jusqu'à la logique de modélisation, **une nouvelle gamme de scanners 3D est en développement**. Ceux-ci permettent de scanner et digitaliser rapidement n'importe quel objet dans l'optique de le reproduire avec une imprimante. Plusieurs logiciels récents ont permis d'augmenter la porosité entre les domaines autrefois distincts du scannage et de la modélisation. En automatisant les procédés, ces derniers permettent aujourd'hui de générer rapidement des modèles sophistiqués. Utilisé par exemple par les services de police et, dans un autre registre, par les passionnés de jeux vidéo, *FaceGen* [123] permet par exemple de modéliser des visages en trois dimensions à partir d'une série de photos. Dans un autre domaine, *Continuum Fashion* [124] offre la possibilité de créer et de modifier des vêtements en ligne en se basant sur les scans des consommateurs se prêtant au jeu.

Les deux services ont mis au point des outils logiciels simplifiés assurant une prise en main rapide au consommateur intéressé uniquement par le résultat. Un autre exemple de la démocratisation en cours du design est la suite logicielle *Digital Forming* [125], qui permet aux sociétés clientes de partager leurs designs produits, mais surtout d'offrir aux consommateurs la possibilité de modifier à volonté ces derniers : dimensions, aspect de la surface, couleur et matériel sont modifiables. Autodesk a également mis au point ses propres produits grand public : *123D Catch* [126] et *123D Make* [127]. Cette **relation de plus en plus étroite entre consommateur et industriel** devrait démultiplier à moyen terme les attentes de personnalisation.

### *Nouveaux codes de partage du design*

Après avoir donné naissance à un nouveau produit, notamment grâce à l'impression 3D, tout créateur doit s'attaquer rapidement à ses stratégies de marketing et de distribution. Si le financement à disposition est limité (c'est généralement le cas pour les particuliers), ce dernier se concentre généralement sur une production en très faible volume destinée à une clientèle et/ou une application spécialisée. Lorsque le produit rencontre du succès, des investissements additionnels permettent de produire des volumes plus importants et d'assurer le marketing et la distribution à travers une vaste zone géographique. C'est seulement à cette étape du développement produit qu'un volume important de consommateurs est concerné. Désormais, grâce aux places de marché ayant émergé telles *Thingiverse* [128], *Shapeways* [129] et *Sculpteo* [130], les cartes du marketing et de la distribution sont rebattues. En août 2012, Shapeways avait ainsi près de 7000 boutiques et plus de 160 000 membres qui ont imprimé plus d'un million de produits. **La société permet aux designers d'être payés directement pour leurs créations et s'occupe elle-même de la distribution.** L'accès à un large public est donc largement facilité.

A l'image du géant chinois du commerce en ligne Alibaba qui a transformé voilà quelques années le lien industriel-consommateur en démocratisant la livraison à domicile, **ces nouveaux acteurs se concentrent sur la livraison de designs.** Etre capable de délivrer de manière quasi-instantanée un design signifie que l'impression peut être effectuée sur demande, dans un bureau de service local, une société indépendante d'impression ou chez le consommateur. L'arrivée de nouveaux entrants sur le marché de l'impression 3D devrait orienter les prochaines évolutions du secteur de la distribution et challenger les acteurs traditionnels.

### *Crowdfunding*

Bien que les imprimantes 3D low-cost et les logiciels de CAO *open source* ont fait voler en éclat quelques barrières à l'entrée traditionnelles pour amener un produit de la conception au marché, un investissement financier même minimal reste nécessaire lors du lancement d'un projet. C'est là que d'autres innovations comme les plateformes de financement participatif jouent un rôle essentiel : *Kickstarter* [131] est l'une des plus connues, et rassemble une multitude de petits investisseurs qui peuvent choisir de soutenir les projets présentés. La plupart des porteurs réunissent moins de 10 000 dollars, mais quelques exceptions ont dépassé le million de dollars.

*Formlabs* [132], une spin-off du *MIT Media Lab* [133], a par exemple atteint son but de 100 000 dollars de financement en moins de trois heures, et a reçu pas moins de 2,9 million de dollars [134]. La société a mis au point une imprimante 3D de haute résolution, abordable pour le particulier.

### *Le concept d'open design*

Le terme *d'open source* (« code source ouvert »), associé aux logiciels libre d'accès comme Linux, Android ou Apache, est entré en quelques années dans le langage courant [135]. La philosophie *open source* repose sur l'idée que toute information doit être partagée librement dans la communauté d'utilisateurs et de contributeurs, ces derniers travaillant pour améliorer le produit ou le logiciel. L'un des meilleurs exemples est l'encyclopédie en ligne Wikipédia [136] qui, à travers les contributions de millions de personnes, est devenu la première encyclopédie référente dans des douzaines de langues, tandis que ses compétiteurs les plus sérieux comme *Encyclopedia Britannica* [137] sont devenus obsolètes.

Le terme *d'open design* s'est peu à peu imposé dans les domaines des produits physiques (outils, machines, composants) à travers le partage de designs et la mise à disposition publique des nouvelles contributions. Il est évident que des imprimantes 3D à bas coût et des logiciels de design abordables sont l'une des conditions *sine qua none* du développement de l'*open design*. L'apparition de produits comme le logiciel *Blender* [120] et l'imprimante RepRap [28] sont donc garants de son développement et de sa pérennité.

#### **L'histoire du projet RepRap**

L'année 2008 a marqué un tournant dans l'histoire du *Do It Yourself* (DIY) avec l'apparition et l'essor du projet RepRap [28, 138]. RepRap est une imprimante low-cost 3D dont les deux premières unités ont été assemblées en mai 2008. En l'espace de quelques minutes, les deux machines avaient commencé à imprimer les composants nécessaires au montage d'une troisième RepRap, et ainsi de suite. On estime aujourd'hui à plusieurs dizaines de milliers de RepRap existantes, et la plupart de leurs composants ont été produits par d'autres imprimantes de la même famille – une vision proche de celle de machines auto-répliquantes. L'objectif est de permettre aux entrepreneurs et aux petites entreprises de construire des produits complexes avec un investissement limité - un kit coûte moins de 500 dollars - notamment dans les régions en développement. Le projet RepRap est *open source* : la totalité des composants (hardwares, électroniques et logiciels) ne sont protégés par aucun brevet. De cette manière, de nombreux particuliers produisent et vendent des imprimantes 3D en ligne, soit sous la forme de kits assemblables, soit sous celle de modèles déjà assemblés et testés. Les innovations sur les imprimantes RepRap sont ainsi plus nombreuses que la plupart des imprimantes 3D traditionnelles. C'est l'un des avantages directs de la philosophie *open source* : une communauté entière se charge de développer le produit cible.

## 5.2. Impacts sur les industries productives

En essayant de faire fi du buzz médiatique et de la propension à surévaluer le potentiel de l'impression 3D, il est complexe de se positionner à moyen terme sur l'évolution de ce(s) marché(s). Une chose est sûre : que ce soit pour les particuliers, les professionnels comme les gros industriels, l'essor de nouvelles technologies d'impression a initié de profondes transformations dans les modes traditionnels de production. Alors que les techniques d'impression 3D évoluent rapidement, le monde de l'industrie manufacturière qui se dessine est caractérisé par :

- *Un temps d'accès au marché en constante réduction.* Cette évolution s'explique par de nouveaux cycles de design et de prototypage rapide, et par le temps économisé grâce à la non-adaptation des usines aux nouvelles lignes de production et la non-production d'outils à usage limité. Avoir une structure agile ne sera bientôt plus un avantage compétitif pour conquérir des marchés, mais une nécessité pour rester dans la course ;
- *Un gain de qualité des produits.* Les produits incluant des composants imprimés en 3D présenteront des caractéristiques avantageuses comme une taille plus adaptée, un poids plus faible, une plus grande résistance mécanique ou simplement un gain de temps à la production et à l'assemblage. Ces produits auront alors un net avantage compétitif. Si l'on voit bien qu'aujourd'hui la qualité des produits imprimés chez le particulier n'est pas nécessairement au rendez-vous, il n'en est pas de même au niveau industriel ;
- *Un mouvement d'open design en plein essor.* Les communautés de consommateurs et de designers seront de plus en plus impliquées dans le design des produits, quelle que soit la nature de ces derniers. Les designs libres d'accès seront supérieurs en qualité aux produits propriétaires existants. Les acteurs souhaitant se positionner sur ce marché se feront concurrence sur la qualité et la mise à disposition des produits, et leurs prestations seront analysées et notées en ligne par les consommateurs ;
- *Une personnalisation devenant la nouvelle norme.* Grâce à l'impression 3D qui permet une personnalisation à prix réduit voire gratuite, les consommateurs vont rapidement intégrer ce processus de personnalisation comme un acquis. Les coûts de fabrication par unité des volumes restreints de production vont approcher petit à petit ceux des productions plus conséquentes, au fur et à mesure que les barrières technologiques tombent ;
- *Des économies de production et de logistique.* L'avantage de prix associé à la production de masse dans les régions à bas coût (ex : Chine, Vietnam) sera challengé par l'impression d'éléments au point d'assemblage et de vente. Les chaînes d'approvisionnement seront optimisées pour tenir compte des productions sur site, en particulier pour les faibles volumes et les composants spécialisés. A l'inverse, les industriels seront toujours capables de minimiser leurs coûts en faisant appel à des composants *low cost* et produits en volume important. Au milieu de ce nouveau monde de l'industrie manufacturière, les procédés traditionnels devront évoluer ou mourir.

Puisqu'un nombre croissant d'acteurs devient producteurs grâce à l'impression 3D, **la porosité entre les secteurs de la production et de la consommation va augmenter**. La production s'intègre dans le secteur de la vente, tandis que les consommateurs et les nouveaux entrants vont eux aussi se préoccuper de production. L'industrie manufacturière telle que nous la connaissons aujourd'hui sera-t-elle morte dans dix ans ? Probablement pas, mais elle aura certainement un visage bien différent de son aspect actuel.

### 5.3. Innovations technologiques

A l'image de nombreux secteurs des hautes-technologies, le secteur de l'impression 3D va profondément se transformer dans les prochaines années. En parallèle d'une réduction accélérée des coûts (et donc des prix des imprimantes, particulièrement dans l'espace du consommateur) et **des avancées attendues en matière de miniaturisation et d'impression multi-colorée**, les scientifiques multiplient les innovations en matière d'intégration de nouveaux composants et de vitesse. Une série de procédés novateurs combinent les bénéfices des procédés traditionnels à soustraction de matière (donc les machines-outils standards) avec les nouvelles techniques d'impression 3D : cela permet notamment de diminuer le temps de *post-processing*. En effet, la plupart des objets métalliques créés par impression 3D nécessite un travail ultérieur, soit de finition ou de simple polissage. *Matsuura Machinery Corporation* a par exemple développé au Japon un système combinant frittage laser et fraisage à haute vitesse [139] capable de fraiser les contours d'un objet imprimé en cinq passages distincts. Ces développements ont permis et permettront dans les années à venir de créer de nouvelles solutions à des problèmes réels, ouvrant la porte à de nouveaux entrants et à une série de « premières mondiales ».

D'autres avancées notables peuvent être considérées comme cruciales : l'impression multi-matériaux est l'une d'entre elles. Un parfait exemple d'imprimante de ce type sur le marché est la *Objet500 Connex3*, qui permet à plus d'une dizaine de matériaux (le plus souvent des matières plastiques, de type caoutchouc comme de type ABS) de 47 couleurs différentes d'être utilisés en même temps [140]. L'aspect impressionnant est que l'ensemble des matériaux est imprimé en une seule passe. Il est alors facile d'imaginer qu'un jour **des appareils électroniques, par exemple des téléphones portables, soient imprimés en une seule pièce : la coque, l'électronique et le verre de l'écran**. Si le répliqueur de type Star Trek nécessite encore quelques bonnes années de développement, il existe par exemple déjà des machines capables de recycler les objets. Le *Filabot* [141] est un excellent exemple de machine de bureau pouvant recycler de nombreux plastiques, comme les boîtes de lait ou les bouteilles de soda, pour en faire des bobines utilisables dans les imprimantes 3D. Le projet a lui aussi été initialement financé par Kickstarter [142].

### 5.4. Une plateforme d'innovation

Etant donné les racines profondes de l'industrie manufacturière et les nouveaux challenges engendrés par l'essor de l'impression 3D, ces nouvelles techniques peuvent-elles réellement changer la donne ? En dépit de l'hypermédiatisation du secteur de l'impression 3D dans les dernières années (auquel ce rapport contribue !), on ne peut que répondre par l'affirmative.

La question réside plutôt dans la vitesse d'adaptation des acteurs traditionnels que dans leur volonté d'accepter ou de rejeter ce nouveau paradigme. A court terme, les techniques d'impression 3D ne seront pas en concurrence frontale avec la production industrielle d'envergure. Elles seront utilisées essentiellement pour le prototypage, pour la confection d'outils et la production personnalisée de produits en faible volume. Au fur et à mesure que la taille des objets imprimables couvrira le « très grand » (> 10 mètres) et le « très petit » ( $10^{-9}$  mètres), et que les vitesses d'impression vont augmenter, l'essor du secteur va s'accélérer.

Ce sera particulièrement le cas lorsque le coût total de la chaîne de la valeur produit sera pris en compte, du design à l'opération en passant par la distribution. Dès lors que les caractéristiques des produits imprimés seront qualitativement supérieures ou égales, ces derniers seront plus compétitifs. Un nombre croissant de startups se précipitera alors dans ce segment prometteur et multipliera les innovations, le tout avec un investissement minimal. Grâce à leur agilité et à des cycles de pénétration de marché très courts, ces jeunes pousses pourront asseoir leur compétitivité sur le segment de la production. Ceux doutant encore de ce postulat devraient s'attarder sur les résultats fantastiques que peuvent avoir des équipes d'ingénieurs et de passionnés, capables de réelles prouesses technologiques grâce à des imprimantes ne coûtant guère plus de 600 dollars l'unité. Un exemple parfait : la fabrication d'un véhicule de combat léger pour l'armée américaine en quelques semaines [143-145]. Si ces équipes sont déjà capables d'être plus efficaces que des sociétés ayant pignon sur rue, qu'en sera-t-il dans le futur ?

Pour des pans entiers de l'industrie, l'impression 3D est aussi un moyen pertinent de **tisser de nouvelles relations entre les mondes du digital et de la haute-technologie et celui de la production traditionnelle**. De nouveaux modèles d'affaires peuvent être imaginés, par exemple l'*outsourcing* des designs 3D. En supprimant des barrières propres à l'industrie productive classique, le secteur engage la créativité des masses, notamment grâce à l'*open design* et aux fournisseurs de services en ligne de plus en plus nombreux (voir ci-dessous).

## 6. ECOSYSTEME DE L'IMPRESSION 3D

### 6.2. Exemples de fournisseurs de services

Société	Origine	Marché cible	Nb matériaux	Livraison (jours)
<a href="#">Quickparts</a>	USA	Industriels, ingénieurs	18	5-10
<a href="#">Core</a>	USA	Industriels, ingénieurs, inventeurs	4	4-10
<a href="#">i-materialise</a>	Belgique	Artistes, designers	13	5-15
<a href="#">In'Tech Industries</a>	USA	Industriels, ingénieurs	15	5-15
<a href="#">Ponoko</a>	USA	Passionnés, designers	11	12-21
<a href="#">RedEye</a>	USA	Industriels, ingénieurs	20	3-5
<a href="#">Sculpteo</a>	France	Passionnés, designers	35	1-3
<a href="#">Shapeways</a>	USA	Passionnés, designers	12	10-21
<a href="#">ZoomRP</a>	USA	Industriels, ingénieurs	6	1-7

## 6.2. Principaux producteurs et fournisseurs d'imprimantes

Société	Origine et présence	Technologie de base	Matériaux
<a href="#">3D Systems Corp</a>	USA, Australie, Pays-Bas, Italie	Modelage à jets multiples, photopolymérisation, frittage laser, dépôt de fil FDM	Métal, polymères
<a href="#">Arcam</a>	Suède	Frittage laser	Métal (titane)
<a href="#">DM3D Technology</a>	USA	Frittage laser	Métal
<a href="#">Envisiontec</a>	Allemagne, USA	Photopolymérisation	Polymères
<a href="#">EOS</a>	Allemagne	Frittage laser	Céramique, métal, polymères
<a href="#">ExOne</a>	Europe, Japon, USA	Modelage à jets multiples	Céramique, métal, polymères
<a href="#">Fabrisonic</a>	USA	Procédés par ultrasons	Métal
<a href="#">MarkerBot</a>	USA, Europe, Asie	Dépôt de fil FDM	Polymères
<a href="#">Optomec</a>	USA	Frittage laser	Métal
<a href="#">Phenix Systems</a>	France	Frittage laser	Céramique, métal
<a href="#">RepRap</a>	Royaume-Uni	Dépôt de fil FDM	Polymères
<a href="#">Stratasys</a>	Allemagne, USA, Inde, Asie	Modelage à jets multiples, dépôt de fil FDM	Céramique, métal, polymères
<a href="#">Voxeljet</a>	Allemagne	Modelage à jets multiples	Céramique, métal, polymères

## 6.3. La position de la France

Il y a encore quelques mois, la France comptait deux fabricants d'imprimantes 3D. Il y en a désormais un de moins : la PMI **Phenix Systems** [146] est passé dans le giron de l'américain *3D Systems Corp.* en juin 2013. Créée en 2000, *Phenix Systems* s'était développée autour d'une technologie originale imaginée par le groupe d'étude des matériaux hétérogènes, laboratoire situé dans l'enceinte de l'Ecole Nationale Supérieure de Céramique Industrielle. Ses machines produisent des pièces en acier, en alliages non ferreux, super alliages, métaux précieux et céramique. La maîtrise de ces matériaux a fortement intéressé le géant américain *3D Systems Corp.* : malgré sa position parmi les leaders, il ne possédait pas jusque-là de machine capable de réaliser des pièces en métal. Il ne reste plus beaucoup de fabricants français de machines 3D : citons l'ex-*Phidias Technologies* devenue **Prodways** [147], entreprise achetée par Groupe Gorgé (une ETI française d'un millier de personnes) et **BeAM** [148], une société héritière des travaux sur le procédé CLAD (Construction Laser Additive Directe), menés depuis dix ans par l'Irepa Laser, centre de transfert de technologie en Alsace. La jeune entreprise a déjà réparé plus de 600 turbines d'avion pour le compte de la société américaine *Chromalloy*, spécialisée dans l'optimisation et la prolongation de la durée de vie des moteurs à combustion [149].

Enfin, d'autres acteurs français se sont positionnés sur des segments de marché différents, comme **Sculpteo** [103], le service d'impression 3D en ligne le plus connu en France, ou encore **3D Slash** qui développe un logiciel de CAO ergonomique et accessible à tous [150]. Avec les champions industriels qui la caractérise et la qualité de ses ingénieurs et scientifiques, la France a le potentiel de se (re)positionner comme l'un des phares du secteur de l'impression 3D.

## 7. POLITIQUE AMERICAINE

### 7.1. Contexte : le programme AMP

Fin juin 2011 à l'université Carnegie Mellon, le président des Etats-Unis Barack Obama introduit pour la première fois un nouveau programme national voué à promouvoir les partenariats industriels. Elaboré pour améliorer la compétitivité et l'innovation industrielle du pays, le « partenariat pour une industrie manufacturière de pointe » (AMP pour *Advanced Manufacturing Partnership* [151]) doit se concentrer sur la conception des technologies de demain et la mise au point de nouvelles méthodes de production. Dotée à l'origine d'un portefeuille de 500 millions de dollars, l'objectif de l'initiative est de faire de l'industrie manufacturière américaine un secteur à nouveau compétitif tout en stimulant la création d'emplois [152].

Cette initiative fait suite à la publication en juin 2011 d'un rapport des Conseillers Scientifiques du Président (*President's Council of Advisors on Science and Technology* [153]). Ce rapport dresse un tableau alarmiste de l'industrie manufacturière aux Etats-Unis, tout particulièrement sur la thématique des biens de haute-technologie. Le secteur a une importance stratégique pour le pays : il représente plus de 160 milliards de dollars de valeur ajoutée (soit 12% du PIB des Etats-Unis) et plus de 11% des emplois (soit 11,5 millions) [154]. L'industrie manufacturière américaine est historiquement tournée vers l'innovation puisque les deux tiers des dépenses privées de recherche et développement lui bénéficient directement. Mais le secteur a subi la crise de plein fouet et, dépassé par la Chine et l'Allemagne depuis 2009, la situation a entraîné une réduction rapide de compétitivité accompagnée d'une disparition massive d'emplois.

Si le coût du travail est régulièrement pointé du doigt dans la presse pour justifier le manque de compétitivité des pays de l'Ouest face notamment aux pays asiatiques, le rapport souligne l'incapacité du pays à réellement innover dans le secteur de la production de biens de hautes-technologies, ce qui entraîne une fuite de cette production vers les pays étrangers. L'Allemagne, dotée d'une politique d'innovation et de R&D forte dans le domaine, est en 2010 le deuxième exportateur mondial de biens manufacturés à haute valeur ajoutée et possède une balance commerciale largement excédentaire malgré un coût du travail élevé (tandis que, toujours en 2010, celle des Etats-Unis est déficitaire à hauteur de 80 milliards de dollars). D'autres pays font de même, tels le Japon, la France et la Suisse. En résumé, les Etats-Unis souffrent du syndrome "inventé ici, produit ailleurs", et le rapport prévoit que, faute d'une réelle mobilisation d'ici 2015, les Etats-Unis risquent de descendre encore plus bas dans les classements.

On comprend mieux l'importance du plan lancé par le gouvernement américain pour tenter de redynamiser le secteur. L'idée est d'assurer que les Etats-Unis restent présents sur toute la chaîne de développement d'une technologie, afin de capter une part maximale de la valeur économique générée. De l'aveu même du Président Obama, « *il est temps d'agir tous ensemble - industriels, universités et gouvernement - pour aider nos fabricants à développer des outils de pointe, nécessaires à leur compétitivité à l'échelle mondiale* ». Et c'est bien là où se situe la spécificité du nouveau plan : tous les acteurs et secteurs sont concernés.

L'approche "traditionnelle", qui était d'investir principalement dans la R&D publique, est repensée car les acteurs de l'innovation sont nombreux et les recherches aux interfaces, fructueuses. C'est donc vers des structures faisant intervenir tous les acteurs de la communauté que les efforts du gouvernement sont focalisés. L'initiative est co-pilotée par un industriel (Andrew Liveris, CEO de *The Dow Chemical Company* [155] et par un académique, en l'occurrence le président du *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). Le programme regroupe une trentaine de partenaires, parmi lesquels on peut retrouver quelques grandes institutions universitaires : MIT bien sûr, Carnegie Mellon, GeorgiaTech, Stanford et UC Berkeley. Du côté industriel figurent des noms comme *Caterpillar*, *Intel*, *Ford*, *Johnson & Johnson* ou encore *Procter & Gamble*. L'initiative AMP vise à établir une plateforme de relations et de co-développement entre toutes ces entités, afin notamment de les pousser à renforcer leurs investissements en R&D. Les universités partenaires se sont par exemple engagées à construire une plateforme collaborative permettant aux industriels d'avoir accès aux dernières innovations en matière de production.

## 7.2. Second round : des pôles d'excellence manufacturière à l'AMP 2.0

En juillet 2012, l'AMP annonce 16 propositions [156] articulées autour de trois objectifs à atteindre : faire émerger l'innovation, sécuriser le vivier de talents et améliorer le climat des affaires. L'action phare est la création d'un réseau de pôles d'excellence manufacturière (MII pour *Manufacturing Innovation Institute*) : un premier institut spécialisé sur l'impression 3D ouvre ses portes mi-2012 à Youngstone dans l'Ohio [157-158]. Financé à hauteur de 50 millions de dollars par l'état fédéral, il inclut 66 sociétés/organisations et 28 laboratoires : son but est d'accélérer l'adoption de l'impression 3D dans le secteur manufacturier américain [159]. Si l'administration Obama souligne que l'institut doit permettre de conserver les emplois manufacturiers sur le territoire national, les emplois mentionnés seront peu nombreux et réservés à une main d'œuvre hautement qualifiée. Ce n'est pas le secteur de l'impression 3D qui permettra de remplacer les emplois perdus dans l'industrie manufacturière traditionnelle : en soutenant ce premier centre pilote, le Président Obama affiche sa volonté d'agir pour relancer l'innovation plus que ses espoirs dans la technologie de l'impression 3D elle-même.

Puis, dans son discours sur l'état de l'Union du 12 février 2013 [160], le président Obama a réaffirmé sa volonté de soutenir l'industrie manufacturière pour relancer l'économie et annonce la création de trois nouveaux MII avec les reliquats de l'AMP.

Le 25 septembre 2013, l'administration fédérale accorde de nouvelles subventions à hauteur de 7 millions de dollars à 44 « collectivités manufacturières » (organisations économiques locales, municipalités, universités ou associations) pour leur permettre de développer le secteur manufacturier local. Cette initiative est la première étape du programme IMPC (*Investing in Manufacturing Communities Partnership*) [161-162]. L'IMPC est un effort majeur dont l'objectif est de récompenser les collectivités pour la création d'un environnement attractif pour les industriels. En mai 2014, 12 municipalités sont désignées *Manufacturing Communities*.

Dès le lendemain, le président Obama annonce la création d'un nouveau comité AMP, dit *AMP 2.0*, pour donner une nouvelle impulsion à l'initiative *Advanced Manufacturing Partnership*. Le nouveau comité doit poursuivre les efforts de recherche mais surtout traduire les propositions du groupe initial en actions concrètes. Dans leur feuille de route notamment, l'accompagnement de la mise en place des trois nouveaux MII précédemment annoncés.

### 7.3. LM3I et DMDII

En février 2014, le Président Obama annonce officiellement l'ouverture de deux des MII [163] : le LM3I Institute (*Lightweight & Modern Metals Manufacturing Innovation*) basé dans le Michigan [164-165] et le DMDII (*Digital Manufacturing & Design Innovation Institute*) dans l'Illinois [166]. Les deux structures voient l'injection de 140 millions de dollars d'investissements fédéraux, associés à 140 millions de dollars de soutiens privés. Le premier institut se concentre sur le développement de moyens optimisés de production de métaux, tandis que le second s'axe sur les thématiques d'un design plus « moderne » et de nouvelles méthodes de production digitalisée. En résumé, les Etats-Unis ont une politique proactive en matière de relance de la production industrielle nationale et d'innovation sur les techniques productives modernes, englobant de fait les technologies d'impression 3D. Le Président Obama a déclaré 2014 « année d'action » sur le sujet, et prévoit le financement d'autres MMI dans les mois et années à venir. Les efforts du gouvernement fédéral et de plusieurs états américains jumelés au phénomène de ré-industrialisation ont déjà permis à plusieurs grandes entreprises de relocaliser certaines gammes de production et/ou une partie de leurs équipes aux Etats-Unis : c'est le cas de Whirlpool, de General Electric ou encore de Google et d'Apple. Comme l'a souligné Rafael Reif, le président du MIT depuis 2012, « il est étonnant comme l'industrie manufacturière était un sujet mort il y a encore quelques années, tandis qu'elle concentre désormais toute notre attention ainsi qu'une grande partie de nos efforts et ressources ». Au vu des enjeux, il y a fort à parier que le sujet restera prioritaire à court et moyen termes.

## 7. CONCLUSION

### 7.1. Mutation du secteur productif traditionnel

Si l'impression 3D a déjà entraîné des évolutions notables en matière de technologies et procédés et impacté les marchés manufacturiers, il est difficile d'appréhender son impact véritable à moyen terme. Les analystes ne font que gratter la surface de ses potentiels tant techniques que de croissance. Gartner a récemment prédit que les technologies 3D atteindraient l'état d'adoption généralisée dans les dix ans à venir, à la fois sur les marchés industriels et de consommateurs [167]. **Les quelques aperçus d'innovation de rupture constatés suggèrent d'importantes mutations dans les dix prochaines années**, et les industriels ont tout à gagner à garder un œil attentif sur les avancées du secteur. La production locale d'objets 3D pourrait un jour être aussi évidente que l'utilisation des imprimantes papier que nous connaissons bien, mais nous sommes encore loin du compte. Lorsque ce jour sera arrivé, et que des mini-usines personnelles seront devenues la norme, il sera probablement très difficile d'imaginer comment les sociétés pouvaient vivre sans les technologies d'impression 3D !

## 7.2. L'avis des analystes de marchés

Les analystes multiplient les études et partagent leurs prévisions de croissance dans la presse spécialisée et financière. *Gartner, Canalys, Wohlers Associates, PwC* ou les établissements bancaires comme *Morgan Stanley* et *Wells Fargo* émettent régulièrement leurs prévisions [168]. La firme *Canalys* par exemple [169] prévoit que **le marché mondial de l'impression 3D croisse de 2,5 milliards de dollars en 2013 à 16,2 milliards de dollars en 2018** [170].

Si les perspectives semblent réjouissantes, nous avons vu que les obstacles sont encore nombreux avant le boom attendu de l'impression 3D. En dehors de quelques machines industrielles très affûtées, coûtant plusieurs millions de dollars chacune, les objets imprimés sont généralement moins résistants que leurs équivalents moulés. La création par couche successive entraîne une faiblesse structurelle dans la troisième dimension (verticale). De plus, la qualité de surface est souvent plus faible, ce qui nécessite des traitements après impression. Les standards de sécurité des pays développés sont contraignants avec certains procédés de l'impression 3D qui, en provoquant la fusion de certaines résines et/ou poudres, peuvent entraîner des pollutions locales.

Un autre désavantage majeur est l'impossibilité de bénéficier d'économies d'échelle. De plus, le temps de production va dépendre du nombre de couches à imprimer : l'impression peut donc durer des heures, voire des jours. Si ces durées sont acceptables pour du prototypage voire des petites séries, ce n'est pas le cas pour la production de masse. La vitesse d'impression restera dépendante de la vitesse à laquelle la tête d'impression peut extraire le matériau utilisé comme intrant. Souvent, les vendeurs d'imprimantes obligent leurs clients à acheter leurs propres matériaux propriétaires, vendus avec des marges importantes. Enfin, l'impression 3D pose des questions au niveau légal. Au-delà des interrogations sur la propriété intellectuelle (quelles règles doivent être établies lorsqu'il est possible d'imprimer la plupart des objets disponibles sur demande ? *Gartner* établit la perte de valeur au niveau IP à 100 milliards de dollars en 2018 pour le secteur industriel), il en est d'autres sur la responsabilité. Par exemple, imaginons un fournisseur de casque de vélo vendant un fichier CAD à un consommateur. Ce dernier l'imprime : en cas d'accident, si le casque a un défaut, qui est responsable ? La société ayant vendu le fichier, la société d'impression 3D, le fournisseur de l'imprimante ? Les protocoles industriels tels que nous les connaissons sont difficiles à imaginer et mettre en place dans la perspective de multiples sites privés de production de biens.

Certains experts pensent donc qu'il n'y a pas de raison valable d'être si optimiste dans le secteur de l'impression 3D. Même si la valeur du marché est multipliée par 10 d'ici à 2018 (la croissance serait donc très forte !), le secteur de l'impression 3D n'en reste pas moins un marché restreint en volume : **c'est d'ailleurs la petite taille de ce dernier qui lui permet de croître aussi rapidement.**

Les sociétés du secteur vont donc continuer à se développer, le marché va se consolider et se restructurer, les technologies s'améliorer et la base de consommateurs – particuliers et professionnels – va s'élargir. Restons néanmoins prudent : si on le compare à d'autres secteurs, comme par exemple celui des pièces automobiles ou des ampoules électriques, le secteur de l'impression 3D reste une goutte d'eau dans l'industrie manufacturière mondiale.

### 7.3. Nouveau concept à la mode : vers une impression 4D ?

Tentons d'imaginer la chaussée d'une autoroute française capable de modifier sa composition chimique et sa structure physique selon les intempéries, ou la quantité de sel présente en surface après de fortes neiges. Ou, dans un autre registre, des uniformes de soldats français capables de s'adapter au contexte environnant afin de proposer le meilleur camouflage ou protéger certaines parties vitales d'éclats d'obus ou d'attaques chimiques. Plusieurs équipes de recherche américaines ont décidé de **pousser la logique de l'impression tridimensionnelle plus loin, plus exactement une dimension plus loin** [171].

Sur des financements essentiellement fédéraux ou du ministère américain de la défense, les scientifiques espèrent développer des matériaux 4D, c'est-à-dire des matériaux dont le comportement pourrait évoluer au fil du temps. Ainsi, plutôt que de construire un objet statique ou caractérisé par des changements de forme mécaniques, l'idée est d'imprimer des matériaux composites biomimétiques capables de **reprogrammer leur forme, leurs propriétés ou leurs fonctionnalités sur la base de stimuli externes**. Les dernières technologies d'impression tridimensionnelle mises au point permettent déjà d'imprimer des fonctionnalités complexes dans les domaines nanoscopiques et microscopiques. De nouvelles voies de production pourront ainsi être mises au point pour les prochaines générations de capteurs intelligents, de revêtements routiers, de textiles et de composants structuraux. La possibilité de créer un tissu capable de réagir à la lumière ou à l'humidité ambiante, voire même à un impact extérieur en se durcissant, ouvrirait un champ totalement nouveau dans le secteur du prêt-à-porter.

Avec l'avènement de l'impression 4D, la rupture de paradigme sera là-aussi réelle. Si nous ne pouvons parler de court terme avant qu'il soit possible de transférer ces technologies au niveau industriel, la vitesse d'émergence des innovations technologiques et scientifiques à notre époque couplée à la rapidité croissante du transfert de technologies des grands pôles de recherche mondiaux - comme ceux que l'on trouve notamment aux Etats-Unis, du type Stanford et MIT - pourraient en faire une réalité pas forcément si lointaine !

---

#### Références

- [1] Biographie de Charles Hull. Disponible sur : <http://bit.ly/VjYMRH>
- [2] Biographie de Scott Crump. Disponible sur : <http://bit.ly/1AcrYcT>
- [3] Site internet de la société *3D Systems*. Disponible sur : <http://www.3dsystems.com/>
- [4] Site internet de la société *Stratasys*. Disponible sur : <http://www.stratasys.com/>
- [5] Site internet de la société *Arcam*. Disponible sur : <http://www.arcam.com/>

- [6] The Washington Post (13/03/2014). *How 3D printing could transform Amazon and online shopping*. Dominic Basulto. Disponible sur : <http://wapo.st/1lZBQ59>
- [7] TechCrunch (10/03/2014). *3D Marketplace 3DLT Talks About Selling The First 3D-Printed Gear On Amazon*. John Bigg. Disponible sur : <http://bit.ly/1gfw3Al>
- [8] Site web d'Amazon – *Recherche sur les modèles 3D*. Disponible sur : <http://amzn.to/1oxnndL>
- [9] TechCrunch (12/07/2013). *eBay Is Latest To Join 3D Printing Craze With New App For Customizable Goods, eBay Exact*. Sarah Perez. Disponible sur : <http://bit.ly/1hDfNvf>
- [10] Fab Foundation. *What is a Fab Lab?* Disponible sur : <http://bit.ly/1oNxSfE>
- [11] Site internet du *Techshop*. Disponible sur : <http://techshop.ws/>
- [12] Citylab (9/07/2014). *The Nerd Garage of Your Dreams*. Kriston Kapp. Disponible sur : <http://bit.ly/1r8MCXd>
- [13] Huffington Post (11/04/2013). *Dad Uses 3D Printer To Make His Son A Prosthetic Hand*. Disponible sur : <http://huff.to/1kAGLt5>
- [14] Stein, R. (17/03/2014). NPR. *Doctors Use 3-D Printing To Help A Baby Breathe*. Disponible sur : <http://n.pr/1ohdbYG>
- [15] Moncrief, M. (27/05/2014). *The Age. 3D printers help surgeons hone their skills on replica body parts*. Disponible sur : <http://bit.ly/1ortpeY>
- [16] Kinder, L. (29/04/2014). *The Telegraph. 3D printed cast could heal bones 40 per cent faster*. Disponible sur : <http://bit.ly/1fMw9Rf>
- [17] Site web de l'école d'ingénierie d'Harvard (26/11/2013). *Harvard materials scientists win award for tiny 3D-printed battery*. Disponible sur : <http://bit.ly/UaP3gz>
- [18] Site internet sur le projet *Infrastructs*. Karl D.D. Willis. Disponible sur : <http://bit.ly/1neYGBk>
- [19] Wired (23/07/2013). *Researchers embed internal tags in 3D-printed objects*. Olivia Solon. Disponible sur : <http://bit.ly/1iadZzE>
- [20] Hasbro (14/02/2014 ). *3D Systems and Hasbro Agree to Co-Venture and Mainstream 3D Printing Play Experiences for Children*. Disponible sur : <http://bit.ly/1wb66L9>
- [21] International Business Times (16/06/2014). *Printeer Makes 3D Printing More Accessible To Kids And Classrooms*. Luke Villapaz. Disponible sur : <http://bit.ly/1vRFcty>
- [22] Site web de Stratasys. *3D Printing for Automotive*. Exemples et cas d'étude. Disponible sur : <http://www.stratasys.com/industries/automotive>
- [23] Computer Graphic World (26/02/2014). *3D Printing Key to Customizing Athletic Equipment*. Disponible sur : <http://bit.ly/1uDOKHR>
- [24] [10] Site web de la NASA. *3D Printing: Food in Space*. Disponible sur : <http://1.usa.gov/1ex2BWj>
- [25] Gizmag (01/02/2014). *3D-printed pizza – a quick and easy meal for astronauts?* Lakshmi Sandhana. Disponible sur : <http://bit.ly/1pdx5oD>

- [26] Rapport Wohlers. *Wohlers Report 2013* (ISBN 0-9754429-9-6). Disponible en version payante sur : <http://wohlersassociates.com/2013report.htm>
- [27] ZD Net (18/06/2013). *Will this \$100 RepRap be the device that takes 3D printing to the masses?* Adam Oxford. Disponible sur : <http://zd.net/1qdNhpR>
- [28] Site internet du projet RepRap. Disponible sur : <http://reprap.org/>
- [29] The Economist (21/04/2012). *A third industrial revolution*. Disponible sur : <http://www.economist.com/node/21552901>
- [30] Von Hippel, E. (2005). *Democratizing Innovation*. MIT Press, Cambridge. Disponible sur : <http://bit.ly/1pMZK3X>
- [31] Biographie de Chris Anderson sur le site Wikipédia : <http://bit.ly/1hBENms>
- [32] Chris Anderson (2012). *Makers: The New Industrial Revolution* (New York: Crown Business, 2012). Ouvrage disponible à la vente sur : <http://amzn.to/1kTX5zT>
- [33] Clayton Christensen, Université d'Harvard. *Définition du concept de technologie de rupture et concepts associés*. Disponible sur : <http://www.claytonchristensen.com/key-concepts/>
- [34] Bower, J. L. and Christensen, C. M. (1995). *Disruptive technologies: Catching the wave*. Harvard Business Review, 73(1):43–53.
- [35] Baldwin, C. Y., and al. (2006). *How user innovations become commercial products: A theoretical investigation and case study*. Research Policy, 35(9):1291–1313.
- [36] Carney, D. (10/06/2013). Popular Mechanics. *3D Printing Can Now Re-create an Entire Classic Car*. Disponible sur : <http://bit.ly/1jmO2ds>
- [37] Site internet de la société Solidoodle. Disponible sur : <http://www.solidoodle.com/>
- [38] Site internet de la société LeapFrog. Disponible sur : <http://www.lpfrg.com/>
- [39] Site internet de la société MakerBot. Disponible sur : <http://www.makerbot.com/>
- [40] Imprimante CubeX de la société 3D Systems. Disponible sur : <http://bit.ly/1svwYJh>
- [41] Site internet the3D.com. Disponible sur : <https://thre3d.com/>
- [42] Gibson, I., Rosen, D. W. et al. (2010). *Design for additive manufacturing*. In Additive Manufacturing Technologies, pages 283–316. Springer US.
- [43] Site internet de l'entreprise Thogus. Disponible sur : <http://www.thogus.com/>
- [44] IndustryWeek (04/06/2013). *From Prototype to Part: The 3-D Printing Makeover*. Travis Hessman. Disponible sur : <http://bit.ly/1pp7jwo>
- [45] Art et sculptures utilisant l'impression 3D. Quelques exemples disponibles sur : <http://3dprintingindustry.com/art-sculpture/>
- [46] Liste non exhaustive de logiciels de CAO sur Wikipédia. Disponible sur : <http://bit.ly/1oF18pR>

- [47] Site web de l'entreprise Choc Edge. Disponible sur : <https://chocedge.com/>
- [48] CNN Money (16/01/2014). *Hershey's to make 3-D chocolate printer*. Disponible sur : <http://cnnmon.ie/1aun3sT>
- [49] Bose, S. et al. (2013) *Bone tissue engineering using 3D printing*. Materials Today. Volume 16, Issue 12, December 2013, Pages 496–504. Disponible sur : <http://bit.ly/1ptmgPG>
- [50] Inzana, JA et al. (2014). *3D printing of composite calcium phosphate and collagen scaffolds for bone regeneration*. Biomaterials 35(13):4026-34.
- [51] CBS News (01/12/2011). *Scientists use 3D printer to make new bones: How?* Ryan Jaslow. Disponible sur : <http://cbsn.ws/1iSdpkW>
- [52] The Guardian (21/06/2012). *The 'chemputer' that could print out any drug*. Tim Adams. Disponible sur : <http://bit.ly/1cPm4H>
- [53] In Pharma Technologists (25/06/2013). *3D Printing Could Create Better Pills say UK Researchers*. Gareth MacDonald. Disponible sur : <http://bit.ly/1qqaPif>
- [54] Iulia D. Ursan et al. (2013). *Three-dimensional drug printing: A structured review*. J Am Pharm Assoc. 53:136-144. Disponible sur : <http://bit.ly/UoNKKW>
- [55] Site web d'Organovo : <http://www.organovo.com/>
- [56] Inhabitat (03/22/10). *Scientists Use 3D Printer to Create First "Printed" Human Vein*. Brit Liggett. Disponible sur : <http://bit.ly/1p0MDyK>
- [57] Gizmodo (24/03/2013). *Scientists Have 3D-Printed Mini Human Livers for the First Time Ever*. Ashley Feinberg. Disponible sur : <http://bit.ly/1su1Hq1>
- [58] 3D Printer (27/09/2011). *MIT's Mediated Matter Group Uses 3D Printing to Mimick Nature to Create Efficient Structures*. Mark Fleming. Disponible sur : <http://bit.ly/1islbGh>
- [59] 3ders (4/12/2012). *MIT lab testing building-scale 3D printing*. Disponible sur : <http://bit.ly/1ptlh12>
- [60] Dezeen (13/03/2013). *MIT researchers to 3D print a pavilion by imitating silkworms*. Disponible sur : <http://bit.ly/1npFaCl>
- [61] Dezeen (20/01/2013). *Dutch architects to use 3D printer to build a house*. Disponible sur : <http://bit.ly/1ptKhX8>
- [62] Site web de la société *Contour Crafting* : <http://www.contourcrafting.org/>
- [63] Coûts des intrants pour l'impression 3D : <http://www.3ders.org/pricecompare/>
- [64] Energies Renouvelables et Environnement, Bureau d'Etudes Industrielles. *Le procédé Bayer*. Accédé le 20/06/2014. Disponible sur : <http://bit.ly/UWFXEU>
- [65] Physorg (10/12/2013). *Titanium powder used to 3D print automotive parts*. Disponible sur : <http://bit.ly/1kxeJKg>

- [66] 3ders (9/12/2013). *Low-cost titanium powders used in 3D printing for the first time*. Disponible sur : <http://bit.ly/1pS4TKf>
- [67] Financial Times (3/12/2013). *Metalysis holds talks on titanium process*. Tanya Powley. Disponible sur : <http://on.ft.com/1nTy4t6>
- [68] Akaishi - *FDM reduces tooling costs by 99% and prototyping costs by 73%*. Disponible sur : <http://bit.ly/1p3Nz5B>
- [69] Bell Helicopter - *FDM Helps Bell Helicopter Build Quality Prototypes*. Disponible sur : <http://bit.ly/1pwZDKj>
- [70] 3D Printing Industry (31/03/2014). *MD Helicopters Turns to 3D Printing for Advanced New Hybrid Design*. David Sher. Disponible sur : <http://bit.ly/1kcWVqD>
- [71] 3D Printing Industry (03/03/2014). *President Obama Announces Two New Advanced Manufacturing Hubs*. Michael Molitch. Disponible sur : <http://bit.ly/1nszIV2>
- [72] Sachdev, A. (02/03/2014). Chicago Tribune. *Digital Lab for Manufacturing: A new way of making things*. Disponible sur : <http://trib.in/1BHSoM>
- [73] US Advanced Manufacturing Portal (25/02/2014). *Lightweight & Modern Metals Manufacturing Innovation (LM3I) Institute*. Disponible sur : <http://www.manufacturing.gov/lm3i.html>
- [74] Site web de la société 3DE, Inc. Disponible sur : <http://www.3deinc.com/>
- [75] EOIR Technology - *Tough Enough for Armored Tanks*. Site internet de Stratasy. Disponible sur : <http://bit.ly/1yxRWrn>
- [76] Lockheed Martin (15/01/2014). *3D Printing Drives Manufacturing Innovation at Lockheed Martin*. Disponible sur : <http://lmt.co/1hvlIM4>
- [77] 3ders.org (17/01/2013). *Lockheed Martin and Sciaky partner on electron beam manufacturing Of F-35 parts*. Disponible sur : <http://bit.ly/1kZyE48>
- [78] Government Technology (4/02/2014). *Does 3-D Printing Change Everything?* David Rath. Disponible sur : <http://bit.ly/1pWez6p>
- [79] University of Sheffield (8/04/2014). *3-D printing trials of unmanned aircraft broaden possibilities for this emergent technology*. Disponible sur : <http://bit.ly/1nsFhP6>
- [80] Breaking Defense (22/04/2014). *Navy Warship Is Taking 3D Printer To Sea; Don't Expect A Revolution*. Sydney J. Freedberg. Disponible sur : <http://bit.ly/QEX37o>
- [81] The Washington Post (15/06/2014). *Why the aerospace industry is investing in 3-D printing*. Amrita Jakayumar. Disponible sur : <http://wapo.st/U2OEwu>
- [82] Communiqué de presse de GE Aviation (10/11/2012). *GE Aviation acquires Morris Technologies and Rapid Quality Manufacturing*. Disponible sur : <http://bit.ly/1kLZzRW>
- [83] The Hartford Courant (05/04/2013). *Pratt To Invest \$8 Million In Additive Manufacturing Partnership At UConn*. Disponible sur : <http://bit.ly/1rw6VRf>

- [84] USA Today (7/10/2012). *3-D printing could remake U.S. manufacturing*. Paul Davidson. Disponible sur : <http://usat.ly/1orgXBd>
- [85] PrintReady.co (17/07/2012). *Boeing Making Airplane Parts Using 3D Printing*. Disponible sur : <http://bit.ly/1rERe7P>
- [86] Site internet de la société *Made in Space* : <http://www.madeinspace.us/>
- [87] www.3ders.org (20/06/2014). *Too soon for 3D printing to significantly enhance space operations*. Disponible sur : <http://bit.ly/1p3yF9E>
- [88] Wired (01/02/2013). *3-D Printed Buildings Coming Soon to a Moon Near You*. Disponible sur : <http://wrd.cm/1p8GmOt>
- [89] Site web de KOR EcoLogic : <http://korecologic.com/>
- [90] Engineering.com (18/11/2013). *Urbee 2 to Cross the US on 10 Gallons of Fuel*. Disponible sur : <http://bit.ly/1zYPaw7>
- [91] The Guardian (04/07/2014). *BMW 3D prints new thumbs for factory workers*. Disponible sur : <http://bit.ly/VIBiff>
- [92] Wake Forest School of Medicine. *Printing Skin Cells on Burn Wounds*. Disponible sur : <http://bit.ly/1zFxOEy>
- [93] Wake Forest School of Medicine. *Engineering a Kidney*. Disponible sur : <http://bit.ly/1sjTAvr>
- [94] Cornell Chronicle (15/07/2014). *Bioengineers, physicians 3-D print ears that look, act real*. Disponible sur : <http://bit.ly/1qcMhG5>
- [95] Mail Online (23/05/2014). *Humans could be fitted with kidneys made on 3D Printing*. Disponible sur : <http://dailym.ai/TB51jU>
- [96] Walter Reed Army Medical Center. Description du *3-D Medical Applications Center (3DMAC)*. Disponible sur : <http://bit.ly/1ntYQ8e>
- [97] Site internet de la société *Bespoke Innovations*. Disponible sur : <http://bit.ly/1aINpEt>
- [98] Sharma, R. (08/07/2013). Forbes. *The 3D Printing Revolution You Have Not Heard About*. Disponible sur : <http://onforb.es/1hTPWF5>
- [99] Projet d'imprimante 3D open source *CupCake CNC*. Disponible sur : <http://bit.ly/1oopNz4>
- [100] Société *Freshfiber*. Disponible sur : <http://bit.ly/1lExmwy>
- [101] Société *FigurePrints*. Disponible sur : <http://www.figureprints.com/>
- [102] Société *My Robot Nation*. Disponible sur : <http://bit.ly/1uo5eqR>
- [103] Société *Sculpteo*. Disponible sur : <http://www.sculpteo.com/en/>
- [104] Société *Shapeways*. Disponible sur : <http://www.shapeways.com/>
- [105] Site internet de l'imprimante *Printrobot*. Disponible sur : <http://printrobot.com/>

- [106] Campagne Kickstarter du projet *Peachy Printer*. Disponible sur : <http://kck.st/NO0V4r>
- [107] Site web de la plateforme *Thingiverse*. Disponible sur : <http://www.thingiverse.com/>
- [108] *MakerBot Academy*. Programme de la société MakerBot Industries. Disponible sur : <http://bit.ly/1qXKgct>
- [109] Programme de la société Stratasys concernant l'éducation. Disponible sur : <http://bit.ly/1pDc1rA>
- [110] Nombre de téléchargements du stylet Nintendo DS (25/07/14) : <http://bit.ly/1tLyFPA>
- [111] Muffatto, M. (2006). *Open source: A multidisciplinary Approach*. In: Series on Technology Management. Imperial College Press, Padua, Italy.
- [112] Reeves, P. (2008). *How rapid manufacturing could transform supply chains*. Supply Chain Quarterly, 2(04):32–336.
- [113] Amy Andrew (18/06/2013). *How start-ups can tap cash from ordinary people and give the prospect of huge profits in return... What is crowdfunding and how does it work?* Mail Online. Disponible sur : <http://bit.ly/1rYMStH>
- [114] Michel Bauwens (2010). *The Emergence of Open Design and Open Manufacturing*. Disponible sur : <http://bit.ly/1rLbdEs>
- [115] Erick de Bruijn (08/11/2010). *On the viability of the open source development model for the design of physical objects. Lessons learned from the RepRap project*. Master's thesis. University of Tilburg, The Netherlands. Disponible sur : <http://bit.ly/UGrn3g>
- [116] Présentation du logiciel 3D CAD Design Software SolidWorks : <http://bit.ly/1Ae7lry>
- [117] Présentation des logiciels CAO Creo 2.0 et 3.0. Disponible sur : <http://creo.ptc.com/>
- [118] Logiciel de CAO 3DTin. Disponible sur : <http://www.3dtin.com/>
- [119] Logiciel de CAO SketchUp. Disponible sur : <http://www.sketchup.com/>
- [120] Logiciel de CAO Blender. Disponible sur : <http://www.blender.org/>
- [121] Logiciel de CAO Tinkercad. Disponible sur : <https://tinkercad.com/>
- [122] Logiciel de CAO 3D Slash. Disponible sur : <https://tinkercad.com/>
- [123] Logiciel de modélisation 3D de visages *FaceGen*. Disponible sur : <http://www.facegen.com/>
- [124] Site internet de la société *Continuum Fashion*. Disponible sur : <http://bit.ly/1kqCWbc>
- [125] Site internet de la société *Digital Forming*. Disponible sur : <http://www.digitalforming.com/>
- [126] Site internet du logiciel Autodesk 123 Catch. Disponible sur : <http://www.123dapp.com/catch>
- [127] Site internet du logiciel Autodesk 123 Make. Disponible sur : <http://www.123dapp.com/make>
- [128] Site web de la plateforme *Thingiverse*. Disponible sur : <http://www.thingiverse.com/>
- [129] Société *Shapeways*. Disponible sur : <http://www.shapeways.com/>

- [130] Société *Sculpteo*. Disponible sur : <http://www.sculpteo.com/en/>
- [131] Plateforme de financement participatif Kickstarter : <https://www.kickstarter.com/>
- [132] Site internet de la société *Formlabs*. Disponible sur : <http://formlabs.com/>
- [133] Site internet du MIT Media Lab : <http://www.media.mit.edu/>
- [134] Campagne Kickstarter de *Formlabs* : <http://kck.st/1g7TTCz>
- [135] Benkeltoum, N. (19/10/2011). *Open source : sortir des idées reçues*. ParisTech Review. Disponible sur : <http://bit.ly/1lXhr3m>
- [136] Site internet et histoire de l'encyclopédie Wikipédia. Disponible sur : <http://en.wikipedia.org/wiki/Wikipedia>
- [137] Site internet de l'*Encyclopedia Britannica*. Disponible sur : <http://www.britannica.com/>
- [138] Histoire du projet RepRap. Disponible sur : [http://en.wikipedia.org/wiki/RepRap\\_Project](http://en.wikipedia.org/wiki/RepRap_Project)
- [139] Site web de *Matsuura machinery Corporation*. Disponible sur : <http://www.matsuura.co.jp/>
- [140] Description de l'imprimante *Objet500 Connex3* sur le site de Stratasys. Disponible sur : <http://bit.ly/1okXFgB>
- [141] Site internet du projet *Filabot*. Disponible sur : <http://www.filabot.com/>
- [142] Campagne Kickstarter du projet *Filabot*. Disponible sur : <http://www.filabot.com/>
- [143] Boyle, R. (30/06/2011). Popular Science. *How The First Crowdsourced Military Vehicle Can Remake the Future of Defense Manufacturing*. Disponible sur : <http://bit.ly/1pXjlpX>
- [144] Mone, G. (10/05/2010). Popular Science. *Hacking the 21st-Century Auto*. Disponible sur : <http://bit.ly/1kmMPxf>
- [145] Site internet de l'agence américaine DARPA (24/06/2011) *DARPA's defense manufacturing efforts support White House vision*. Disponible sur : <http://bit.ly/1AUM5xx>
- [146] Site internet de la société *Phenix Systems*. Disponible sur : <http://www.phenix-systems.com/en>
- [147] Site internet de la société *Prodways*. Disponible sur : <http://www.prodways.com/en/>
- [148] Site internet de la société *BeAM*. Disponible sur : <http://bit.ly/1ytOfSv>
- [149] Les Echos (07/05/2014). *BeAM répare des pièces d'avion avec l'impression en 3D*. Disponible sur : <http://bit.ly/1szlseb>
- [150] Site internet de la société 3d Slash. Disponible sur : <https://3dslash.net/home.php>
- [151] The White House, Office of the Press (24/06/2011). *Secretary President Obama Launches Advanced Manufacturing Partnership*. Disponible sur : <http://1.usa.gov/1yaJ5Jn>
- [152] Bulletin Electronique USA #255 (15/07/2011). *Initiative American Manufacturing : vers un retour du "Made in USA ?"*. David Boucard Planel. Disponible sur : <http://bit.ly/1sC3whM>

- [153] Site internet du *President's Council of Advisors on Science and Technology*. Disponible sur : <http://1.usa.gov/K728IM>
- [154] President's Council of Advisors on Science and Technology (Juin 2011). *Report to the President on ensuring American leadership in Advanced Manufacturing*. Disponible sur : <http://1.usa.gov/1F8KUJ>
- [155] Site internet de la société *The Dow Chemical Company*. Disponible sur : <http://www.dow.com/>
- [156] President's Council of Advisors on Science and Technology (Juillet 2012). *Report to the President on capturing domestic competitive advantage in advanced manufacturing*. Disponible sur : <http://1.usa.gov/1nLS4Pm>
- [157] Bulletin Electronique USA #344 (11/10/2013). *Industrie manufacturière aux Etats-Unis - Partie 1 : un écosystème défaillant*. Adrien Destrez. Disponible sur : <http://bit.ly/1AZ5AFg>
- [158] Bulletin Electronique USA #346 (25/10/2013). *Industrie manufacturière aux Etats-Unis - Partie 2 : collaborer pour réussir*. Adrien Destrez. Disponible sur : <http://bit.ly/V2x8st>
- [159] Site internet de l'initiative *America Makes: National Additive Manufacturing Innovation Institute (NAMII)*. Disponible sur : <http://1.usa.gov/1FLHJD>
- [160] The Atlantic (12/02/2013). *Obama's 2013 State of the Union Speech: Full Text*. Disponible sur : <http://theatlantic.com/1pFimTg>
- [161] The White House, Office of the Press (28/05/2014). *Obama Administration Designates the First 12 Manufacturing Communities through the Investing in Manufacturing Communities Partnership to Spur Investment and Create Jobs*. Disponible sur : <http://1.usa.gov/V6xvlz>
- [162] Description de l'initiative *Investing in Manufacturing Communities Partnership (IMCP)*. Disponible sur : <http://www.eda.gov/challenges/imcp/>
- [163] The White House, Office of the Press (25/02/2014). *President Obama Announces Two New Public-Private Manufacturing Innovation Institutes and Launches the First of Four New Manufacturing Innovation Institute Competitions*. Disponible sur : <http://1.usa.gov/1hb35WS>
- [164] Description et enjeux du *Lightweight and Modern Metals Manufacturing Innovation (LM3I) Institute*. Disponible sur : <http://1.usa.gov/1gwwsjQ>
- [165] Informations complémentaires et liens concernant le *Lightweight and Modern Metals Manufacturing Innovation (LM3I) Institute*. Disponible sur : <http://1.usa.gov/XKG33n>
- [166] Description et enjeux du *Digital Manufacturing & Design Innovation (DMDII) Institute*. Disponible sur : <http://1.usa.gov/1on0spk>
- [167] Pete Basiliere, Gartner (08/10/2013). *High-Tech Tuesday Webinar: 3D Printing: The Hype, Reality and Opportunities Today*. Disponible sur : <http://gtnr.it/XfsrNC>
- [168] Columbus, L. (08/09/2014). Forbes. *Roundup Of 3D Printing Market Forecasts And Estimates, 2014*. Disponible sur : <http://onforb.es/XVDbAR>
- [169] Site internet de la société *Canalys*. Disponible sur : <http://www.canalys.com/>

[170] Canals (31/03/2014). *3D printing market to grow to US\$16.2 billion in 2018*. Disponible sur : <http://bit.ly/1szbwm8>

[171] Fedel, J. (30/09/2013). University of Pittsburgh. *Entering a New Dimension: 4D Printing*. Disponible sur : <http://bit.ly/1swlwd0>

### Ouvrages sur l'impression 3D

Berchon, M. (2013) *L'impression 3D*. Eyrolles.

Lipson, H. et al. (2013) *Fabricated: The New World of 3D Printing*. Wiley.

Anderson, C. (2014) *Makers: The New Industrial Revolution*. Crown Business.

Hatch, M. (2013) *The Maker Movement Manifesto: Rules for Innovation in the New World of Crafters, Hackers, and Tinkerers*. McGraw-Hill.

Pettis, B. et al. (2012) *Getting Started With MakerBot*. Maker Media.

Hood-Daniel, P. (2011) *Printing in Plastic: Build Your Own 3D Printer (Technology in Action)*. Apress.

Hiscox, G.D. (2007) *1800 Mechanical Movements, Devices and Appliances*. Dover Publications.

Stross, C. (2012) *Rule 34*. Ace.

Cannon, W. (1986) *How to Cast Small Metal and Rubber Parts (2nd Edition)*. McGraw-Hill Professional.

Evans, B. (2012) *Practical 3D Printers: The Science and Art of 3D Printing*. Apress.

Brown, H.T. (2010) *507 Mechanical Movements: Mechanisms and Devices*. Watchmaker Publishing.

Singh, S. (2010) *Beginning Google Sketchup for 3D Printing*. Apress.

Hess, E. (2009) *The CNC Cookbook: An Introduction to the Creation and Operation of Computer Controlled Mills, Router Tables, Lathes, and More*. Scited Publications.

Floyd Kelly, J. (2009) *Build Your Own CNC Machine*. Apress.