



LOUVAIN
School of Management

UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN
LOUVAIN SCHOOL OF MANAGEMENT

**ANALYSE DE L'ÉTAT ET DE L'AVENIR DU MARCHÉ DE
L'IMPRESSION 3D**

Promoteur :
M. Bernard Paque

Mémoire-recherche présenté par
VERHULST Julien (4672-08-00)

en vue de l'obtention du titre de
Master en sciences de gestion

ANNEE ACADEMIQUE 2014-2015

Remerciements

Je remercie tout d'abord mon promoteur, M. Bernard Paque qui a accepté de m'encadrer et de me guider tout au long de ce mémoire.

Mes remerciements vont aussi à toutes les personnes ayant contribué à ce mémoire en répondant à mes questions.

Merci aussi aux employés de Ricoh Belgium qui ont été une source de motivation.

Ensuite, je remercie ma famille et mes proches, qui m'ont soutenus tout au long de mon parcours académique.

Table des matières

INTRODUCTION	1
SECTION 1 : L'IMPRESSION 3D.....	4
CHAPITRE A : Définition	6
CHAPITRE B : Avantages et mythes de l'impression 3D.....	10
CHAPITRE C : Histoire de l'impression 3D	14
CHAPITRE D : Aspects techniques.....	20
SECTION 2 : LE MARCHÉ	29
CHAPITRE A : Hype Cycle.....	32
CHAPITRE B : Adoption de l'impression 3D	36
CHAPITRE C : Domaines d'application industriels.....	42
CHAPITRE D : Marché des particuliers	49
CHAPITRE E : Perspectives de marché	53
SECTION 3 : DÉVELOPPEMENTS FUTURS	55
CHAPITRE A : Les marchés	56
CHAPITRE B : Progrès technologiques	62
CHAPITRE C : Impacts socio-économiques	70
CHAPITRE D : Aspect légal.....	75
CHAPITRE E : Autres développements futurs	78
SECTION 4 : ANALYSE DES INTERVIEWS	81
CONCLUSION	86
BIBLIOGRAPHIE	88
ANNEXES	Error! Bookmark not defined.

INTRODUCTION

En 1977 à Boston, dans une salle de congrès pleine du World Future Society, Ken Olson, président de la Digital Equipment Corporation (DEC), annonce sans hésitation « [qu'] il n'y a pas de raison pour les individus d'avoir un ordinateur à domicile » (Lai, 2008). La prédiction qui fait sourire aujourd'hui représente pourtant bien ce qui se passe actuellement sur la scène de l'impression 3D – aussi connue sous la dénomination d'Additive Manufacturing (AM). Parfois présentée comme troisième révolution industrielle, l'impression 3D n'a vraisemblablement pas fini de nous surprendre. Plus ou moins avancée selon les secteurs dans lesquelles elle est déjà présente, pas un jour ne passe sans une annonce qui semble préfigurer son irrésistible ascension. L'impression 3D s'imisce partout, y compris dans le monde de la finance, un nouveau fonds d'investissement composé presque exclusivement de titres du secteur d'AM le prouve. L'intérêt pour ce processus de création ne semble pas prêt de retomber.

« L'impression 3D « a le potentiel de révolutionner la façon dont nous concevons presque tout »

(Barack, O. 2013).

L'impression 3D a été listée par le Financial Times comme un élément de changement avec potentiellement plus d'impact qu'Internet. Deux camps s'affrontent : ceux qui pensent que cette technologie sera disruptive, et ceux qui croient que cette technologie suscite un intérêt immense et un énorme battage médiatique, mais que l'excitation retombera une fois la tendance passée. Au même titre que l'Internet mobile, l'Internet des objets ou les véhicules autonomes ou semi-autonomes, l'impression 3D est identifiée par le McKinsey Global Institute comme une des douze technologies potentiellement disruptives (Manyika & al., 2013). La même certitude se retrouve dans le rapport des dix technologies émergentes de 2015 du World Economic Forum. L'AM est citée comme une technologie prometteuse. Selon les analystes, de profonds impacts sont attendus pour 2025. Cela signifie que l'impression tridimensionnelle est une technologie nouvelle qui, une fois maîtrisée, est porteuse de changements intenses dans l'économie et la culture (Larkin & al., 2015). Afin d'être qualifiée de disruptive, le ratio prix sur performance doit pouvoir rapidement s'ajuster face à des approches alternatives. Il est

aussi nécessaire que l'impact économique soit important et affecte largement les industries. Finalement, les nouvelles solutions doivent changer la façon dont vivent les individus sur le long terme (Manyika & al., 2013). Même s'il semble très optimiste d'annoncer un monde dans lequel les consommateurs n'achèteraient plus de biens manufacturés, mais imprimeraient leurs produits, il semble évident que le mode de production actuel sera bouleversé à la suite de l'adoption massive d'imprimantes 3D personnelles.

Ce mémoire est divisé en quatre parties. L'objectif est d'avoir une vue synthétique sur l'ensemble du marché de l'impression 3D et son avenir.

La première partie de ce travail consiste à définir l'impression 3D afin de démystifier le processus et de comprendre ses avantages. Existants depuis plusieurs décennies, les technologies 3D étaient dédiées à un public restreint. Ce n'est qu'assez récemment dans son histoire qu'elles ont capté l'intérêt d'une plus large audience. Une remise en perspective historique permettra d'évaluer les degrés de maturité des techniques. Finalement, les aspects techniques seront abordés au travers des matériaux utilisés et des techniques d'impression 3D.

La deuxième section porte sur le marché de l'impression 3D qui connaît une croissance impressionnante. En 2019, le marché total – les équipements d'AM, les consommables et les services associés – est estimé à 6 milliards de dollars (Freedonia, 2013). Celui-ci sera analysé au travers du prisme du 'hype cycle' de Gartner. Cela permettra de déterminer dans quelle phase se trouve le marché. L'adoption de nouvelles technologies sera abordée, le potentiel effet disruptif de l'impression 3D et les modèles d'intégration de ses technologies dans une chaîne de valeur seront discutés. Enfin, les domaines d'applications industrielles et l'offre aux particuliers seront traités.

« Les turbulences du marché que nous voyons aujourd'hui sont l'extension logique de tendances qui ont commencé il y a des décennies »

(Foster & Kaplan, 2001, p.10.)

La troisième partie a trait aux évolutions futures de l'impression 3D. De nouvelles opportunités de marché vont voir le jour grâce à l'augmentation du nombre de machines et sa plus grande disponibilité au public. Ces possibilités seront mises en parallèle avec

les limites techniques dont souffrent encore les équipements tridimensionnels qui sont autant de défis à surmonter. L'impression 3D aura aussi des impacts socio-économiques qu'il est important d'évaluer. L'aspect légal de l'AM et ses potentielles dérives – la fabrication d'une arme de poing avait fait sensation et avait enregistré plus de cent mille téléchargements du modèle en deux jours (Greenberg, 2013) – ainsi que son impact écologique seront traités.

La quatrième, et dernière section, est le résultat de l'analyse d'interviews réalisés avec des personnes actives dans le domaine de l'impression 3D. L'objectif est de comprendre leurs besoins futurs et leur vision du secteur en lien avec les technologies d'AM et vérifier que cette dernière correspond aux prédictions.

SECTION 1 : L'IMPRESSION 3D

L'impression 3D – qu'il serait plus correct d'appeler les impressions 3D – intéresse de plus en plus les industriels et les particuliers. Bien que la technologie ne soit pas nouvelle, sa popularité croissante remonte à une décennie tout au plus. Cet intérêt transparait, entre autres, au travers des recherches effectuées sur Internet. Ainsi, pour les mots clefs les plus généraux « 3D print » et « 3D printing », la tendance est clairement à la hausse (cfr. Annexe B). Cette attention semble prendre de l'ampleur à partir de 2011, année de grandes prouesse dans le monde médical avec l'impression tridimensionnelle de vaisseaux sanguins artificiels.

L'intérêt ne semble pas spécifique à une zone géographique bien définie, bien que l'Amérique du Nord, l'Europe (la Grande-Bretagne et les pays nordiques en tête), l'Afrique du Sud et certains territoires asiatiques ont des moyennes de recherches supérieures au reste du monde.

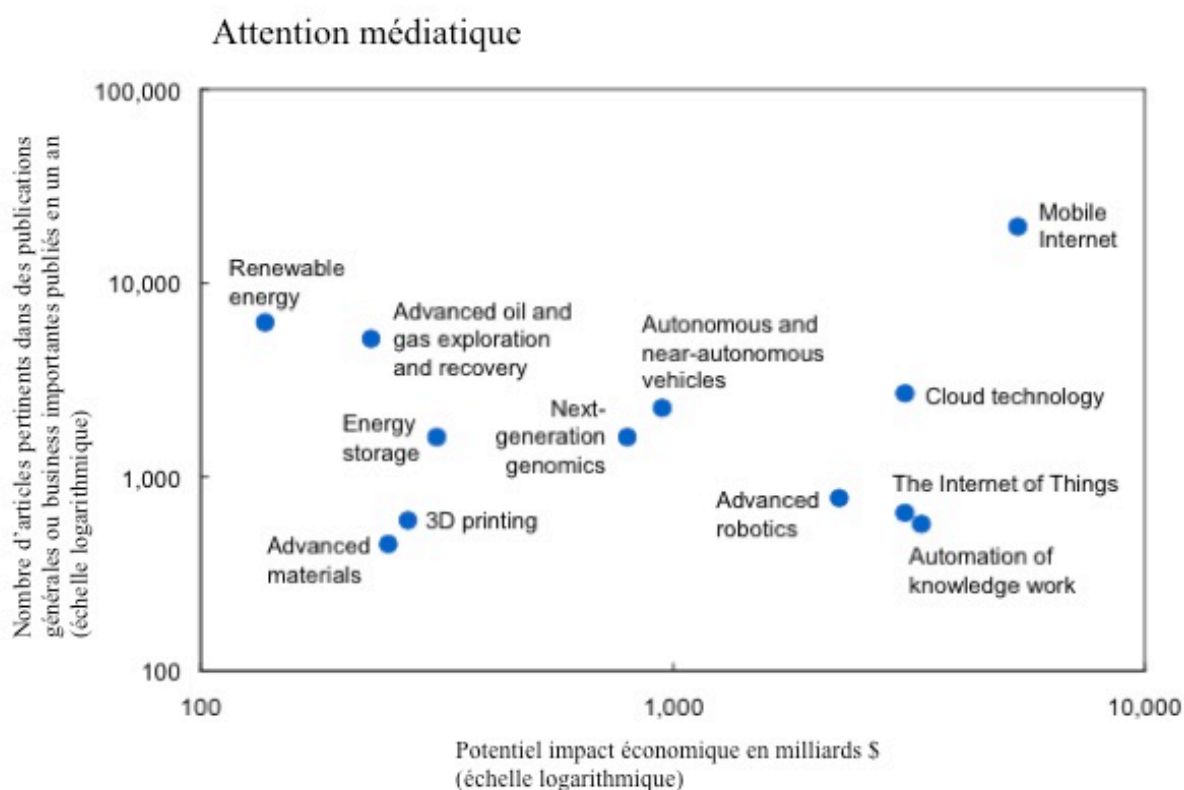


Figure 1 : D'après Manyika, J., Chui, M., Bughin, J., Dobbs, R., Bisson, P., & Marrs, A. (2013). *Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy* (Vol. 180). San Francisco, CA, USA: McKinsey Global Institute.

L'intérêt ne se fait pas ressentir que sur Internet, les médias relaient aussi l'intérêt croissant que suscite l'impression 3D. Cependant, dans le champ des nouvelles technologies, l'attention ne porte pas exclusivement sur la 3D. Les occurrences relatives à l'Internet mobile ou aux véhicules autonomes lui sont, par exemple, supérieures.

CHAPITRE A : Définition

L'impression 3D englobe l'ensemble des techniques de création d'objets tridimensionnels par machines contrôlées numériquement. Ces techniques se différencient radicalement des méthodes de production classiques qui fonctionnent par soustraction de matière. Trois méthodes de fabrications traditionnelles, qui peuvent être combinées, existent (Bradshaw, Bowyer & Haufe., 2010) :

1. Couper des formes dans un bloc de matériaux
2. Ajouter des fragments de matière pour construire une forme
3. Mettre en forme une matière à l'état liquide ou malléable et la stabiliser

L'American Society for Testing and Materials (ASTM), un organisme qui délivre des standards relatifs aux activités industrielles, définit cette méthode de création comme :

« Un processus d'assemblage de matériaux afin de fabriquer des objets à partir de données d'un modèle 3D, habituellement couche après couche, par opposition aux méthodes soustractives de fabrication » (ASTM International, 2013, p. 2).

Dans la pratique, l'impression 3D est aussi connue sous la dénomination d'Additive Manufacturing (AM). Les deux termes peuvent être utilisés indifféremment – le deuxième terme ayant historiquement un ancrage plus professionnel, car utilisé depuis plusieurs décennies pour du prototypage industriel. Il est important de garder à l'esprit que les deux termes – bien qu'employés indifféremment dans beaucoup de publications – ne sont pas de parfaits synonymes (cfr. Chapitre D, Section 1). D'autres dénominations sont aussi employées parmi lesquelles : e-manufacturing, freedom fabrication, generative manufacturing, rapid manufacturing, constructive manufacturing, direct digital manufacture et additive fabrication (Allison & Scudamore, 2014).

Le prototypage rapide, autre dénomination, est dit « rapide », car plus prompt que d'autres méthodes de fabrication assistées numériquement et « prototypage », car trop lents et chers pour une production de masse.

Idées fausses

Un certain flou entoure aussi la définition de ASTM International (cfr. supra) qui est parfois mal comprise. L'impression 3D étant un terme en vogue et susceptible d'attirer l'attention, certaines sociétés n'hésitent pas à qualifier leurs produits d'imprimantes 3D à tort. La société de produits de beauté suédoise FOREO n'a, par exemple, pas hésité à qualifier sa machine MODA de première imprimante 3D de maquillage (Molitch-Hou, 2015). L'appareil est un grand rectangle blanc dans lequel il est possible d'insérer la tête qui se fait alors maquiller automatiquement. Si pour certains, cet appareil représente une avancée technique, ce n'est pourtant pas de l'impression 3D, car il n'y a pas de création d'objets par assemblage. Similairement, le Pancakebot est une plaque de cuisson surmontée d'une seringue qui dépose une pâte comestible afin de pouvoir réaliser des motifs contrôlés par ordinateur (Vernasco, 2015). Il n'y a qu'une couche de matière déposée et donc un abus dans sa qualification d'imprimante 3D. La définition la plus saugrenue de l'impression 3D qui puisse être trouvée est une citation de Bill Nye – un vulgarisateur scientifique américain – qui prétend que l'utérus est la première imprimante 3D (Molitch-Hou, 2013).

Arrivés plus tardivement que les imprimantes 3D grand public, les stylos 3D ne font pas partie des méthodes de création 3D à proprement parler. Utilisant les mêmes matériaux, que certaines machines pour particuliers, des thermoplastiques, ils déversent un fin filin de matière fondue qui se refroidit au contact de l'air. Avec un peu de dextérité, il est possible de réaliser de petites structures. Néanmoins, il ne s'agit pas d'instruments guidés par ordinateurs et le produit fini n'est pas fait d'une succession de couches. Dès lors, cela ne permet pas de classer un tel outil dans la famille des imprimantes tridimensionnelles.

Processus de fabrication

La figure 2 schématise le processus de fabrication d'un objet. De manière générale, l'AM se base sur un modèle numérique tridimensionnel réalisé à l'aide de logiciels CAD (Computer Aided Design). Ces modèles existent sous forme de fichiers digitaux enregistrés dans des formats standards. Une fois ouverts dans un logiciel préparant l'impression, ils sont analysés et transformés en instructions envoyées à l'imprimante – cette étape est appelée le 'slicing'. L'addition progressive de matière par couches successives forme graduellement l'objet physique. Une fois ce processus réalisé,

des opérations de postproduction peuvent être réalisées en fonction des matériaux utilisés et de la qualité finale désirée. Cotteleer, Holdowsky & Mahto (2014) citent parmi ces opérations de postproduction ; le ponçage, le remplissage, le polissage, le durcissement ou la peinture.

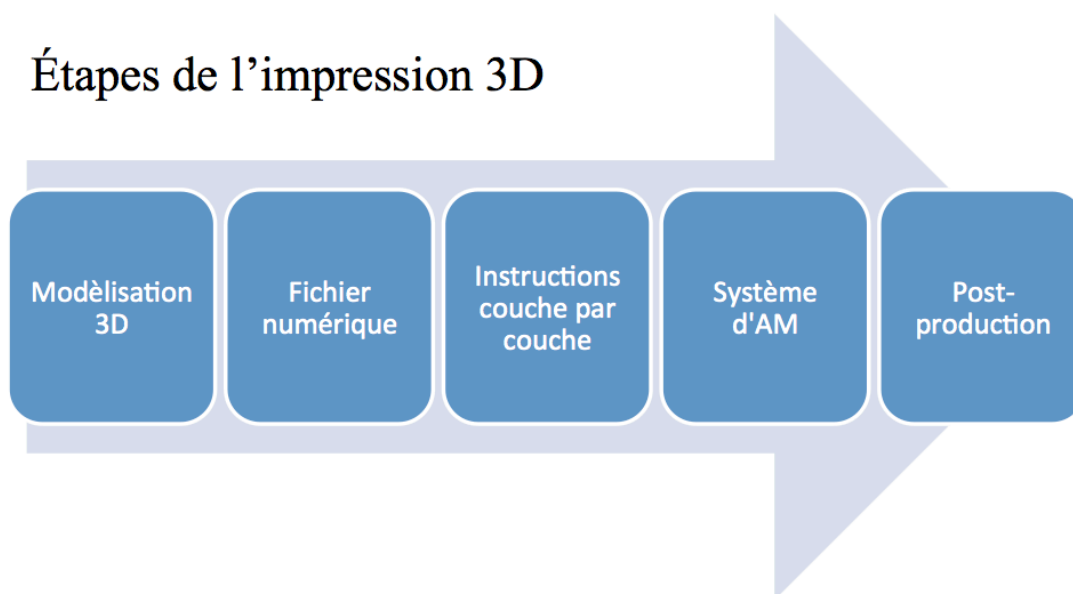


Figure 2 – Basée sur mon expérience personnelle

Des initiatives plus ou moins conséquentes ont vu le jour en Europe et ailleurs afin de déterminer et exploiter les possibilités de l'Additive Manufacturing. Ainsi en Allemagne est né le Direct Manufacturing Research Center (DMRC), doté d'un budget de plus de 11 millions d'euros pour cinq ans, qui lie le milieu académique et industriel. Le gouvernement anglais annonçait, en octobre 2012 par la voie du ministre David Willetts, un investissement gouvernemental de 7 millions de livres pour l'AM technologies for Research and Development, Universities and Science.

Aux États-Unis, l'administration Obama voit d'un œil positif l'arrivée de l'AM et prévoit un impact positif sur son économie si la technologie est largement adoptée. La création du National Additive Manufacturing Innovation Institute (NAMII) répond à cette idée et s'articule principalement autour de trois axes : la compréhension et performance des matériaux, les qualifications et certifications dans le secteur, les capacités de production et de contrôle des processus.

Expérience impression 3D

Durant le deuxième quadrimestre de ma deuxième année de master, j'ai eu l'occasion de faire un stage chez Ricoh Belgium. La société, active dans l'impression 2D, est intéressée par les opportunités de la 3D. C'est pourquoi j'ai travaillé au lancement d'une machine 3D sur le marché. Cela m'a permis d'en apprendre beaucoup sur le sujet et a été d'une grande aide à la réalisation de ce travail.

CHAPITRE B : Avantages et mythes de l'impression 3D

De par son approche radicalement différente des schémas de production classique, l'AM permet de bénéficier de plusieurs avantages au point de vue du design, de l'utilisation des matériaux, de la réduction des émissions polluantes ou du time-to-market.

L'impression 3D permet la conversion rapide dans le monde physique d'un modèle numérique réalisé grâce à l'assistance d'un ordinateur (CAD). Une large liberté de création permet une customisation plus grande de la production et permet la confection d'objets complexes qu'il serait difficile d'obtenir par des moyens de fabrication traditionnelle. Par exemple, un conduit de refroidissement dans un monobloc métallique est difficilement manufacturable avec des moyens classiques ou nécessiterait de réaliser l'objet en plusieurs parties. De par la méthode en couche par couche de l'AM, une telle confection est réalisable. C'est ce qui vaut à l'AM sa qualification de « complexity free ». Produire des objets complexes n'augmente pas les coûts de la production. De plus, l'accès à de nouveaux designs et à la possibilité de faire du sur mesure permettent de réaliser des créations optimisées plus légères, mais tout aussi résistantes.

L'impression tridimensionnelle permet de réaliser des pièces uniques, personnalisées pour le consommateur final. Certains fabricants de produits sportifs utilisent, par exemple, les possibilités de l'AM pour créer des chaussures de course en phase avec la biomécanique des individus.

Il est possible d'approcher au plus près le stade final du produit, réduisant le nombre d'opérations de postproduction nécessaires à son utilisation ou commercialisation éventuelle. De plus, les déchets relatifs à la fabrication d'objet peuvent potentiellement tendre vers zéro. Actuellement, une réduction de l'ordre de 90% est déjà possible en se servant de techniques qui utilisent de la poudre ou des polymères photosensibles. Cela se traduit par moins de pollution, effet qui est encore multiplié par l'adoption en croissance constante de matériaux sans composant toxique.

L'impression 3D peut parfois se montrer plus rapide que des moyens de production traditionnelle, réduisant dès lors le temps avant commercialisation et/ou la

chaîne de production. L'AM est aussi un bon moyen de réaliser une grande variété de produits avec une seule machine.

Les cycles de fabrication des produits peuvent être raccourcis. L'importance peut être mise sur la vitesse de mise sur le marché (Cotteleer & Openshaw, 2014). Les chaînes de production basées sur des méthodes traditionnelles peuvent ne pas être capables de suivre la cadence imposée par des opérations peu centralisées. La multiplication de centres de production de plus petite taille, mais plus nombreux permettent une plus grande réactivité à l'échelle locale et une plus grande attention face aux attentes du marché.

Le choix des matériaux est aussi un avantage des méthodes classiques de production. Il y a bien une augmentation des matériaux disponibles pour l'impression 3D, mais la liste n'est pas aussi étendue que pour l'industrie traditionnelle. Pour le moment, seulement des thermoplastiques, du métal, de la céramique et d'autres matériaux composites sont disponibles pour l'AM (pour plus de détail voir section Matériaux).

Finalement, la taille des objets produits par impression est également réduite comparativement à ce qu'il est possible de faire dans l'industrie manufacturière. Pour des objets de grande taille, il est impossible – à moins de décomposer son produit – d'utiliser l'AM.

Il existe toutefois des secteurs pour lesquels la production par impression tridimensionnelle est devenue une solution qui a complètement remplacé les méthodes classiques de production. C'est le cas, par exemple, pour la fabrication de pièces spécifiques pour des moteurs en aéronautique. Une réduction du prix de l'ordre de 30% est possible pour des pièces ayant un ratio faible entre le poids des matériaux de base sur le poids de l'objet fini. Ce cas de figure extrême est dû à des quantités de matières chères, nécessaires en masse, qui sortent du processus traditionnel de production en ayant parfois été réduites jusqu'à 98% de leur masse initiale. Sont aussi pris en compte dans le calcul le coût spécifique de l'équipement nécessaire à l'ajout ou la soustraction de matière ainsi que le coût de la main-d'œuvre particulièrement élevé dans ce secteur (Allen, 2006).

Répartition des coûts de production d'un objet en fonction de la méthode de fabrication.

Ventilation des coûts de production d'une pièce d'un kilo de titane				
	avec des moyens classiques de production		avec une imprimante 3D	
	£	%	£	%
Coût de l'énergie	£15,89	1,63%	£2,69	4,34%
Coût du travail	£112,11	11,53%	£-	0,00%
Coût de dépréciation	£16,82	1,73%	£3,74	6,04%
Coût de consommables	£2,24	0,23%	£0,50	0,81%
Coût des matériaux	£825,00	84,87%	£55,00	88,81%
TOTAL	£972,06	100%	£61,93	100%

Figure 3 : Basée sur la recherche de Allen, J. (2006). *An investigation into the comparative costs of additive manufacture vs machine from solid for aero engine parts. Cost effective manufacture via net-shape processing*, 17, 1-10. Neuilly-sur-Seine: RTO

La figure 3 illustre bien les possibles économies réalisables grâce à l'utilisation de machines 3D. Dans le cas de la fabrication d'une pièce d'un kilo en titane 6-4 (l'alliage le plus commun composé de 6% d'aluminium, 4% de vanadium, de maximum 0,25% de fer, de maximum 0,2% d'oxygène et le reste de titane), le coût de la matière première est largement supérieur aux autres postes de coûts. Le travail de transformation classique produit beaucoup plus déchets que lors de l'impression dudit objet. De plus, la main d'œuvre – deuxième poste le plus gourmand – est réduite à zéro.

L'utilisation d'une imprimante 3D dans ce cas de figure apparaît comme un bénéfice évident pour le producteur. Il faudrait toutefois prendre en compte le coût salarial d'un opérateur responsable de la machine. Son rôle étant de calibrer la machine et de réaliser les opérations de post-traitement, ce qui prend moins de temps que de travailler sur la pièce de métal, il peut aussi être occupé à d'autres tâches pendant la phase automatique d'impression.

Mythes de l'AM

L'impression 3D fait souvent la une de la presse et est parfois présentée comme la troisième révolution industrielle. Son impact sera sans nul doute important, mais il faut contrer quelques idées fausses récurrentes à son sujet. C'est notamment le cas en ce qui concerne la liberté de design. Même si l'AM permet une grande liberté de création, celle-ci n'est pas infinie et reste limitée par des contraintes techniques et physiques.

Bien qu'un des premiers noms utilisés pour évoquer l'impression 3D ait été celui de prototypage rapide, la technologie n'est pas très véloce. L'attribut de vitesse élevée est justifié dans le cas du seul usage de création de prototypes. Il n'y a alors pas à créer d'éventuels moules qui prendraient alors plus de temps à être réalisés par des méthodes traditionnelles que par impression. L'usage des machines tridimensionnelles s'étant étendu à d'autres applications, la vitesse n'est plus le seul facteur déterminant. Il faut toutefois signaler que de gros efforts sont réalisés par les constructeurs pour réduire le temps de fabrication nécessaire à la réalisation de projet. La facilité d'utilisation et la souplesse d'adaptation sont en revanche devenues les points forts de la technologie pour tous ses usages.

Une utilisation sans aucun déchet est encore inatteignable dans un futur proche, mais l'AM y arrivera à terme. En fonction de la complexité des modèles produits et des matériaux utilisés, il est déjà possible à l'heure actuelle de diminuer les déchets de production jusqu'à 90% (Cotteleer, Holdowsky & Mahto, 2014). Ces résultats impressionnants sont atteints lors de création de pièces avec de la matière liquide ou en poudre qui se solidifie suite à un apport énergétique. Une partie seulement du matériau sera transformée en objet solide, le reste restant dans la cuve d'impression et pouvant resservir pour un travail ultérieur.

L'impression 3D n'est pas applicable à toutes les opérations de production. Elle peut néanmoins s'avérer utile pour des petites quantités de produits complexes et/ou customisés. Comme nous l'avons évoqué plus haut, cela est dû à la logique économique des coûts de productions.

CHAPITRE C : Histoire de l'impression 3D

L'impression tridimensionnelle semble avoir débarqué seulement récemment sur la scène médiatique, cette technologie a pourtant déjà trois décennies d'existence. Cela contraste avec l'idée majoritairement répandue qui veut que l'impression 3D soit un procédé nouveau et avant-gardiste. Le processus de création est alors connu sous le nom de technologie de prototypage rapide (3D Printing Industry, 2014). Il faut toutefois relativiser, les expériences passées ayant eu des résultats bien moins surprenants que ceux d'aujourd'hui et étant restées plus confidentielles. Les aspects techniques seront développés au chapitre suivant.

La première personne à imaginer un tel processus est, sans véritable surprise, un inventeur et auteur de science-fiction. Dans les années 60, Arthur C. Clarke parle de « machine à répliquer », le célèbre « Replicator » de 2001 : l'Odyssée de l'Espace, adapté au cinéma par Stanley Kubrick.

Une deuxième apparition à souligner dans l'univers de la fiction est la photocopieuse en trois dimensions inventée par le professeur Tournesol. Le scientifique d'Hergé conçoit sa machine en 1972 dans Tintin et le lac aux requins (Leblanc, 1972, animation).

La première véritable technologie tridimensionnelle voit le jour dans les années 80, lorsque Charles Hull réalise la première machine de stéréolithographie (SL). Grâce à cette machine, il devient possible de donner une existence physique à des modèles numériques (Hull, 1986). En 1986 il devient cofondateur de la société 3D Systems en Californie. Cette entreprise ayant validé un grand nombre de brevets, elle est toujours détentrice d'un large portfolio de technologies toujours utilisées à ce jour. En 1987, 3D Systems dévoile la SLA-1, la première machine commerciale de prototypage rapide. Elle est commercialisée l'année suivante (3D Systems, 2001).

À l'image de la création d'Internet, plusieurs chercheurs travaillaient sur le même sujet et se disputent la paternité de la technologie. 1987 est aussi l'année durant laquelle Carl Deckard de l'Université du Texas introduit une demande de brevet pour un processus de prototypage appelé Selective Laser Sintering (SLS). Le brevet lui sera délivré en 1989 (Deckard, 1989). Deux ans plus tard, Scott Crump demande à son tour

une protection de son procédé : Fused Deposition Modelling (FDM). Le brevet lui sera délivré en 1992 (Crump, 1992). La même année, il fonde avec sa femme, au Minnesota, la société Stratasys. C'est aujourd'hui le deuxième plus grand acteur du domaine après 3D System¹. En Europe EOS est fondé par l'allemand Hans Langer qui est très actif dans les techniques de frittage laser (fusion de poudre grâce à l'énergie d'un laser de forte puissance). Sa compagnie met au point la technique de Direct Metal Laser Sintering (DMLS) et commence sa commercialisation en 1990 (3D Printing Industry, 2014).

D'autres méthodes de prototypage rapide sont mises au point à cette époque. De façon non exhaustive, il faut citer celle introduite par William Masters, le Ballistic Particle Manufacturing (BPM). En 1990 et 1997 Itzhak Pomerantz et ses collègues ainsi que Michael Feygin déposent des brevets pour respectivement le Solid Ground Curing (SGC) et le Laminated Object Manufacturing (LOM), le Three Dimensional Printing (3DP) de Emanuel Sachs et al. (Additive 3D, sd). De cette multiplication de méthodes ont été créés beaucoup d'entreprises utilisant ces techniques. Dans beaucoup de cas, elles ont pris la forme de spin off d'universités avant de parfois devenir indépendantes. De cette époque ne restent plus que quelques acteurs qui ont résisté et ont une réelle présence globale. Ceux-ci sont au nombre de trois : deux américains (3D System et Stratasys) et un européen (EOS).

Historique des techniques de prototypage rapide

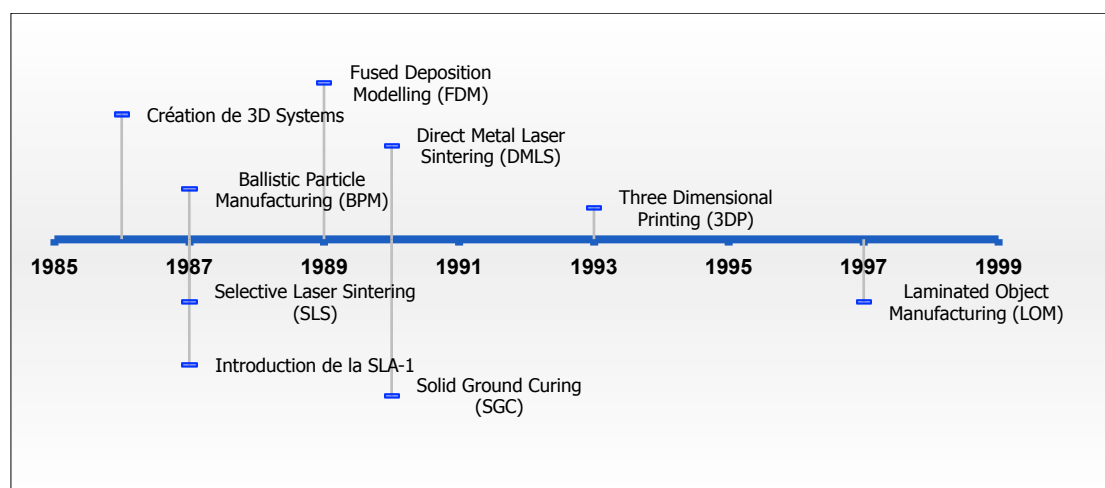


Figure 4 – Basée sur les recherches ci-dessus

Dans les années 90 et au début des années 2000, le secteur reste principalement centré sur l'industrie. De nouvelles méthodes sont encore introduites et élargissent les

¹ Basé sur les indices boursiers au 03/11/2014

champs d'applications. Une nouvelle terminologie voit le jour avec l'apparition de termes spécifiques tels que le Rapid Tooling (RT), ou le Rapid Manufacturing (RM). La liste des matériaux alors compatibles avec les méthodes de prototypage rapide commence à s'allonger, de nouvelles résines et plastiques deviennent compatibles.

Cette période marque aussi le début de quelques tentatives de commercialisation grand public. L'entreprise Z Corporation voit le jour en 1996 en proposant une technologie mise au point au Massachusetts Institute of Technology. Un an plus tard, l'entreprise Arcam est créée suivie de Objet Geometries.

C'est durant le milieu des années 90 que commence à s'esquisser un début de diversification aujourd'hui bien visible : d'un côté les machines qui sont utilisées dans l'industrie manufacturière, de l'autre les prémices des systèmes pour particuliers. Dans l'industrie la liste de secteurs dans lesquels l'AM est représenté s'allonge. L'aérospatial, l'automobile, le médical sont les premiers secteurs à intégrer partiellement la technologie à leurs chaînes de production. De gros investissements en recherche et développement sont concédés afin d'augmenter la fiabilité des techniques et de leurs résultats. Des solutions moins coûteuses sont à l'étude pour toucher un plus large public. Certaines sociétés veulent offrir des machines capables de produire des prototypes à coûts inférieurs et plus faciles à faire fonctionner.

Le Dr Adrian Boyier et son équipe de l'Université de Bath lancent en 2005 le projet RepRap. L'objectif est de créer une machine capable de fabriquer une partie des pièces utiles à son fonctionnement. La particularité de cette machine auto-répliquative réside dans le système libre de droits mis en place afin d'accélérer son développement. Ainsi tous les codes utilisés par la machine sont en Open Source sous licence publique générale GNU. L'aspect communautaire de la démarche est au centre du projet et profite de l'ingénuité des participants afin d'arriver à son but : rendre l'impression 3D plus accessible au public en démocratisant son coût.

En 2008, Darwin, la première imprimante partiellement auto-répliquative voit le jour. Depuis d'autres machines ont été introduites, chacune ayant des spécifications supérieures à la précédente.

En 2007, l'entreprise 3D System propose à la vente un système d'impression pour moins de 10.000\$. Ce montant était alors considéré par certains analystes comme le

déclencheur de l'entrée de l'impression 3D dans l'univers des particuliers (3D Printing Industry, 2014). Deux ans plus tard, en 2009, la société MakerBot Industries confirme l'envie des fabricants d'offrir des solutions grand public. S'inspirant du projet RepRap, ce fabricant américain propose un kit Do It Yourself (DIY). Un cap est franchi dans le secteur des imprimantes 3D personnelles en 2012, l'entreprise Solidoodle propose des machines basiques à un prix juste inférieur à 500\$ (Jeffries, 2012). Sam Cervantes, le fondateur, explique : « nous nous concentrons sur [la fabrication de] la machine abordable et facile à utiliser » (Kraftwurx, sd). Le graphe ci-dessous illustre la diminution des prix moyens des imprimantes utilisant la technologie FFF ou FDM (cfr. Chapitre D, Section1) - représentant la majeure partie des machines vendues aux particuliers.

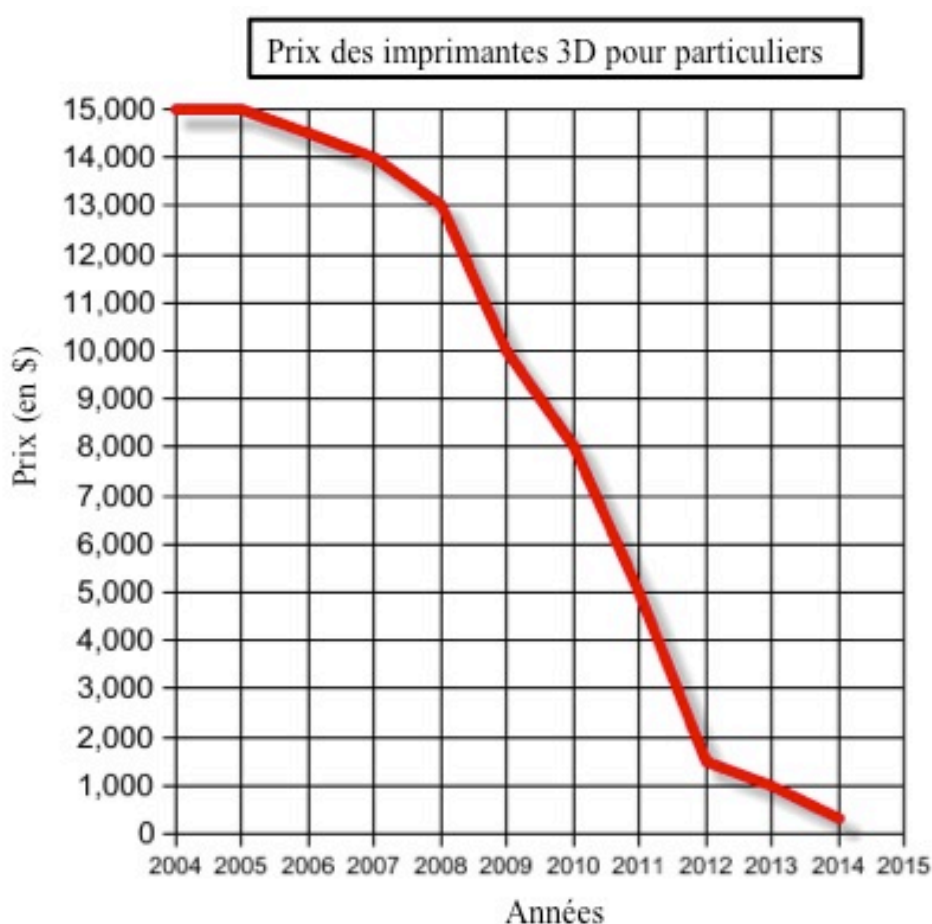


Figure 5 : D'après Wize. (sd). *History of 3d printing*. En ligne <http://www.wize3d.com/history-of-3d-printing/>, consulté le 17 juillet 2014.

Dans le domaine médical, 2011 est également l'année durant laquelle des chercheurs réussissent à imprimer des vaisseaux sanguins artificiels à l'institut Fraunhofer (Hertel, 2014). La recherche progressant, une équipe de l'institut Wake Forest

de médecine régénérative réussit, en 2013, à fabriquer des organes viables de taille réduite. Afin d'y parvenir, les chercheurs ont utilisé une imprimante 3D à laquelle des modifications avaient été effectuées afin de fonctionner avec des cellules (Wake Forest, sd). La recherche de cette faculté ne s'est pas arrêtée en si bon chemin et travaille maintenant à d'autres projets semblables comme l'impression de cellules de peau sur des brûlures.

Plus anecdotique, la même année, le créateur de mode Michael Schmidt et l'architecte Francis Bitonti présentent une robe entièrement produite à l'aide d'imprimantes 3D. Elle sera imprimée par Shapeways et portée par Dita Von Teese à New York (Ferrier, 2014).

En 2013, une information a eu l'effet d'une bombe lors de son annonce, elle concerne la fabrication d'une arme de poing entièrement en plastique, mais néanmoins fonctionnelle (Cooke, 2012). C'est le résultat d'une année de travail pour un collectif texan s'appelant Defense Distributed. L'objectif que défend cette association est de « *défendre la liberté civile de l'accès populaire aux armes tels qu'ils sont garantis par la Constitution des États-Unis et confirmés par la Cour suprême, en facilitant l'accès mondial aux armes, et la production collaborative de l'information et des connaissances liées à l'impression 3D des armes et à publier et à diffuser de telles informations et connaissances en matière de promotion de l'intérêt public* » (Defense Distributed, sd). Il est possible de trouver sur Internet les plans du Liberator – puisque c'est le nom de l'arme – ce qui ne rassure pas les autorités (Gerlache, 2013). Peu de temps après, la société Solid Concepts a présenté un pistolet Colt M1911 imprimé en métal et voué à être commercialisé (PRWeb, 2013). Il n'y avait pas d'objectifs politiques derrière cette annonce, contrairement à celle du groupe texan précédent, mais une recherche de diminution des coûts a expliqué un responsable (Le Monde, 2013). Depuis lors, il n'est pas rare de trouver des modèles d'armes à feu sur des sites de partage de design 3D. Un moteur de recherche de modèle 3D classe les armes (toutes catégories) à la septième place des objets les plus recherchés sur sa plateforme (Chantrel, 2013).

Le secteur des constructeurs d'imprimantes tridimensionnelles a connu de grandes opérations de fusions et acquisitions. Le leader historique, 3D Systems fait régulièrement l'acquisition de start-up prometteuses et détenant des brevets que la société intègre à son portefeuille déjà bien fourni. Parfois des acquisitions de plus grande

ampleur ont lieu. Ainsi, les entreprises Z Corporation et Vidar ont été acquises par 3D Systems en 2012 pour 135,5 millions de dollars (3D Systems, 2012). Ce rachat a permis un renforcement de sa position auprès du secteur industriel. Le challenger américain Stratasys – bien que plus économe en acquisitions – a également connu de profonds bouleversements suite à sa fusion avec Objet Geometries Ltd en 1998. En 2014, la compagnie s'est offert Makerbot, une société bien représentée auprès des semi-professionnels pour un montant de 400 millions de dollars (McGrath, 2015).

CHAPITRE D : Aspects techniques

Depuis quelque temps déjà, l'impression 3D est un sujet en vogue. Toutefois, le sujet reste relativement mal connu d'une majorité de gens. Ainsi bien que d'être « révolutionnaire » la technique semble pourtant complexe et mystérieuse – voire parfois tout droit sortie d'un roman de science-fiction.

Petit tour d'horizon sur les matériaux, techniques d'impression et outils d'aide à la création...

Matériaux

L'impression 3D étant conçue à la fois pour des particuliers et des industriels, les besoins de matériaux varient fortement et le spectre des matières est large. Certaines des techniques d'impression tridimensionnelles existent depuis plus de trois décennies (cfr. supra). Un éventail plus ou moins large des matériaux est donc disponible en fonction des machines et des technologies.

Plastiques

Le premier matériau auquel les gens pensent est le plastique. Celui-ci présente un double avantage, il est à la fois économique – ce qui répond bien à la demande pour usage personnel – et possède des propriétés physiques intéressantes et faciles à contrôler. Les « recharges » prennent généralement la forme de filaments qui progressent dans la machine au rythme de leur fonte. Les types de plastiques les plus couramment utilisés:

- L'ABS (acrylonitrile butadiène styrène) est le matériau de base pour les imprimantes 3D personnelles. Il a une bonne tenue aux chocs et possède une masse volumique relativement faible. Il est souvent utilisé dans les appareils électroménagers, l'industrie nautique et dans l'automobile. Les briques de LEGO en sont une illustration marquante. Sa température de fonte est la plus élevée parmi les plastiques présentés ici. Au contact de l'air, il se rétracte légèrement ce qui rend l'usage d'un plateau d'impression chauffant indispensable afin que l'objet ne subisse pas de modification en cours d'impression. De nombreux coloris sont offerts à la vente – du transparent au plus coloré. De par sa bonne résistance, l'ABS peut subir des opérations de

post-traitement (ponçage, polissage, peinture, traitement à l'acétone, etc.). Des simili-ABS sont aussi utilisés sous forme de polymères liquides pour des méthodes d'AM autres que le FFF ou FDM (cfr. infra).

- Le PLA (acide polylactique) a l'avantage d'être biodégradable et peut être issu de matériaux recyclés. Généralement utilisé par l'industrie agroalimentaire pour emballer les produits, il peut être conçu grâce à de l'amidon de maïs. Lorsqu'il fond, il ne sent pas aussi fort que l'ABS et a besoin de températures moins élevées. Il peut être utilisé comme structure de soutien soluble à l'hydroxyde de sodium (soude caustique). Tout comme l'ABS de nombreuses couleurs sont commercialisées – jusqu'à des filaments phosphorescents (Leapfrog, sd). Il existe aussi des PLA dans lesquels d'autres matériaux – majoritairement sous forme de poudre – sont ajoutés afin de bénéficier de propriétés supplémentaires. Il est ainsi possible de trouver des filaments qui donnent un rendu métallique aux objets imprimés, certains ont des propriétés magnétiques ou encore une résistance accrue à la chaleur et aux mouvements mécaniques (Proto-pasta, sd).
- Le PVA (alcool polyvinylique) possède une bonne résistance aux produits gras – comme les huiles et les graisses. De plus, utilisé sur une faible épaisseur, il est flexible. C'est la famille de plastique la plus coûteuse et la plus fragile. Cependant, il est soluble dans l'eau ce qui en fait un matériau de choix lors de l'impression de modèles complexes qui nécessitent des structures de soutien, celle-ci pouvant alors être retirées facilement.
- Le nylon (hexaméthylène adipamide) est un thermoplastique, il peut être fondu et réutilisé à l'infini sans perdre ses propriétés de liaison. De plus, il ne dégage presque pas d'odeur lorsqu'il est chauffé. Malheureusement, il est nécessaire de soumettre le matériau à une forte pression ce qui rend son utilisation incompatible avec certaines machines.
- Les polyamides (PA) prennent généralement la forme d'une fine poudre blanche. Ils ont l'avantage d'être biocompatibles et sont donc utilisés pour des applications médicales ou de stockage de nourriture. Résistant et souple à la

fois, la surface des objets produits est légèrement poreuse (à l'inverse de l'ABS et du PLA).

L'utilisation de ces différents types de plastiques dépend des propriétés recherchées. De plus, le nombre grandissant d'imprimantes 3D (FFF) avec plus d'une tête d'impression ajoute des opportunités d'impression. Il devient par exemple possible d'imprimer avec plusieurs types de matériaux (idéal lorsque des structures de soutien sont nécessaires) ou dans diverses couleurs.

Il faut aussi noter l'apparition régulière de nouveaux plastiques aux propriétés inédites. C'est le cas, par exemple, de l'Elasto Plastic, une matière flexible qui contraste avec les autres variétés (Biggs, 2013). Il faut aussi citer les plastiques conducteurs (car contenant de la fibre de carbone) qui permettent l'impression de circuits électroniques (MakerGeeks, sd).

Résines

La deuxième grande famille de matériaux utilisés pour l'impression en trois dimensions sont les résines – même si elle est parfois rangée dans la même catégorie que les plastiques. Celles-ci sont multiples et variées, possédant des propriétés hétéroclites. Elles sont principalement utilisées sous forme liquide ou en poudre. Généralement photosensible, ce type de matière est utilisé par des techniques d'impression qui nécessitent de gros investissements.

Comme pour les plastiques, les résines ont une palette de couleurs extrêmement large – certaines étant même transparentes ou phosphorescentes. Les résines peuvent subir des post-traitements et contenir des matériaux qui viennent ajouter leurs propriétés à la substance de base. C'est par exemple le cas avec des résines époxy chargées de nano particules de céramique. L'utilisation de cire est plus répandue et largement utilisée par certaines technologies 3D nécessitant des structures de soutien.

Métaux

Des matières plus nobles peuvent aussi être utilisées pour l'impression 3D. C'est le cas pour certains aciers, l'alumine, du cobalt-chrome, des alliages ou même le titane, l'or et le platine. Les applications principales de ces matériaux sont pour le moment cantonnées au secteur médical et à l'industrie high-tech du fait de leur prix élevé de production et des techniques industrielles d'AM utilisées. Des initiatives ciblant les

particuliers sont aussi lancées dans la joaillerie (la société belge Materialise étant la première firme mondiale à proposer un tel service). Les métaux prennent la forme de poudre qui est fixée par laser (Materialise, 2011).

Matériaux organiques

Certaines machines d'impression tridimensionnelles permettent de travailler avec des cellules vivantes pour concevoir des tissus humains. Afin de concevoir une structure organique, un gel est mis dans la forme souhaitée. Ensuite des cellules sont injectées et sont laissées dans un environnement contrôlé afin qu'elles se développent.

La société Organovo est une pionnière en ce domaine et conçoit une machine pour la recherche pharmaceutique (Khatiwala & al., 2012).

Céramiques

Certaines imprimantes peuvent fonctionner avec de la poudre de céramique. Il existe une variété étendue de matériaux parmi lesquels figurent le carbure de silicium, la silice, le graphite, le plâtre, etc.

Autres

Il existe encore beaucoup de matériaux qui peuvent être utilisés pour l'impression 3D. La liste ne fera que s'allonger au fil du temps, lorsque la technologie s'améliorera et se révélera capable de maîtriser les propriétés des matières.

Il est déjà possible de faire fonctionner des machines avec des matières alimentaires, des seringues remplies d'aliments en pâtes permettent de créer des formes et de réaliser une structure. Une entreprise anglaise fut la première à commercialiser une imprimante à chocolat. Il est aussi possible d'imprimer des structures relativement complexes en sucre. Le projet PERFORMANCE, financée par un fonds de développement européen, cherche à mettre au point une solution d'impression alimentaire pour les personnes âgées pour qui la consommation de nourriture peut être un défi quotidien (Performance, sd).

Il faut également citer parmi les matériaux possibles le papier, le bois, le plâtre, le verre et le béton.

Techniques d'impressions 3D

Il existe actuellement plusieurs processus d'impression en trois dimensions. Toutes les techniques partagent pourtant un principe de base, les objets construits se font par ajout successif de matière – d'où l'appellation d'Additive Manufacturing utilisée comme quasi synonyme pour l'impression 3D. La totalité de la matière utilisée se retrouve dans la création sans qu'il n'y ait de production de déchets (sauf éventuels supports irrécupérables).

L'AM-platform, un organisme européen, dont « l'objectif est de contribuer à une stratégie cohérente, la compréhension, le développement, la diffusion et l'exploitation des AM » classe les processus d'AM en sept catégories en fonction des matériaux utilisés, des techniques de dépôt ou la façon dont la matière est solidifiée ou fusionnée (AM platform, sd). Chaque genre est composé de technologies légèrement différentes.

Vat photopolymerisation

Cette technique de prototypage rapide, mise au point aux États-Unis, repose sur la photo-polymérisation. C'est-à-dire la capacité qu'ont certains matériaux à réagir à la lumière (UV) ou à la chaleur. À l'état liquide dans une cuve, la surface est frappée par un laser ou une lampe UV dont la trajectoire est contrôlée par des miroirs mobiles. Le liquide est alors solidifié là où il a été exposé et ce qui n'a pas été exposé peut être réutilisé. Ce processus est aussi connu sous la dénomination de *light polymerisation*.

- Méthode : Stéréolithographie (SLA)

Ce procédé d'impression est le plus ancien. Il a été mis au point par Charles Hull (voir section sur l'histoire de l'impression 3D) dans les années 80. Du fait de son ancienneté, le format de fichier .stl développé pour les machines utilisant cette méthode est devenu un standard pour l'impression 3D.

- Autre méthode : Digital Light Processing (DLP).

Material jetting

Cette technique peut être comparée aux imprimantes classiques – en 2D – qui utilise le système de jet d'encre. À la place d'encre envoyée sur le papier, la tête d'impression envoie de la matière photosensible ou réagissant aux UV. Une source d'énergie est directement appliquée sur celui-ci afin de le fixer.

La technique permet l'usage de différents matériaux simultanément dans une création. Pour des modèles à géométrie complexe, l'utilisation de structures de support est envisageable. Dans ce cas, un post-traitement est nécessaire pour s'en débarrasser.

- Méthode : Multi-jet Modeling (MJM).

Binder jetting

Des particules de matière sont déposées sur le plateau d'impression et sont liées entre elles par l'ajout d'un liquide agrégateur, souvent de la colle. Il est possible d'ajouter de l'encre à la poudre pour colorer le modèle. Une fois la première couche réalisée, et ayant eu le temps de se solidifier, le lit d'impression est abaissé et la couche suivante est ajoutée.

- Méthodes : Powder Bed and Inkjet Head printing (PBIH), Plaster-based 3D Printing (PP).

Extrusion de matière

Commercialisées à partir du début des années 90, les imprimantes par extrusion de matière liquéfient du plastique (majoritairement ABS et PLA) et déposent strate par strate une fine couche de celui-ci sur une plaque. La matière se refroidit au contact de l'air et se solidifie rapidement. De plus en plus d'autres matériaux peuvent être utilisés avec cette technique qui semble se généraliser. L'avantage de cette technique est son coût d'utilisation plus faible que les solutions alternatives et des éléments relativement peu avancés technologiquement (comme des lasers).

- Fused-Filament Fabrication (FFF)

Cette technologie est similaire au Fused Deposition Modeling (FDM), bien que celle-ci soit la propriété de Stratasys.

Depuis l'avènement du RepRap project (cfr. Chapitre C, Section 1) cette technologie est devenue la plus abordable et la plus répandue. Beaucoup de constructeurs ont basé leurs machines sur les bases développées par le projet. Cela est d'autant plus vrai que, comme l'indiquent Bradshaw et al. (2010), la technologie s'est miniaturisée et les fonctionnalités des produits ont été largement

augmentées (p.5-31). La FFF est la méthode d'AM utilisée par les particuliers et est bien souvent la seule connue par eux.

Powder bed fusion

Cette technologie exploite le même procédé que pour la vat photopolymerisation, mais sans phase liquide. La différence réside en l'absence du besoin d'une cuve pleine de polymères. À la place, des matières sous forme de poudre (polystyrène, nylon, verre, céramique et quelques métaux) sont fixées par l'apport énergétique d'un laser ou une autre source thermique.

- Méthode: Selective Laser Sintering (SLS)

La technique de forage par application laser a un fonctionnement proche de la stéréolithographie. Comme avec son prédécesseur, les inputs non employés peuvent resservir. Cette méthode a été développée par Carl Deckard à l'Université du Texas à Austin en 1987. La même année il cofonde Desk Top Manufacturing Corp (University of Texas at Austin, 2012).

- Autres méthodes : Electron Beam Melting (EBM), Selective Heat Sintering (SHS), Direct Metal Laser Sintering (DMLS).

Sheet lamination

De fines plaques de matière (plastique, métal, papier) sont mises ensemble en utilisant des techniques diverses – colle, soudage ultrasonique, etc. À chaque couche, un laser ou un outil tranchant enlève les contours de l'objet désiré. Utilisé avec du papier, il est facile de colorer le modèle en envoyant de l'encre sur les feuilles.

Cette technique est généralement reprise parmi les technologies 3D, mais elle suscite un débat. En effet, elle ne répond pas à la définition proposée par l'ASTM qui oppose les approches d'impression 3D aux méthodes de fabrication soustractives qui sont en partie utilisées lors du processus.

- Méthodes : Laminated Object Manufacturing (LOM), Ultrasonic Consolidation (UC).

Direct energy deposition

La matière est fondue au moment où elle se dépose par une source thermique très dirigée. Cette technique permet l'utilisation de filaments de matériau ou de poudre.

- Méthode : Laser Metal Deposition (LMD).

Matériaux et technologies

Nous avons recensé les principaux matériaux et les technologies utilisées par l'impression 3D. Il faut toutefois préciser que certaines technologies ne peuvent fonctionner qu'avec certaines matières.

Le tableau ci-après (figure 6) indique quels types de matériaux peuvent être utilisés avec les méthodes d'impression 3D les plus importantes.

Technologie	Polymères	Métaux	Céramiques	Composites
Stéréolithographie	●			●
Digital light processing	●			
Multi-jet modeling	●			●
Fused deposition modeling	●			
Electron beam melting		●		
Selective laser sintering	●	●	●	●
Selective heat sintering	●			
Direct metal laser sintering		●		
Powder bed and inkjet head printing	●	●	●	●
Plaster-based 3D printing			●	●
Laminated object manufacturing	●	●	●	●
Ultrasonic consolidation		●		
Laser metal deposition		●		●

Figure 6 – Basée sur les recherches ci-dessus

SECTION 2 : LE MARCHÉ

Le marché de l'impression 3D connaît une croissance à deux chiffres. Les projections de la demande mondiale totale (en prenant en compte les produits – machines et matériel associés – et services liés à cette technologie) annoncent un taux de croissance de 21% par an pour les deux ans à venir (Freedonia, 2013). En 2011, la taille du marché mondial a été estimée à 1,7 milliard de dollars et devrait atteindre 6 milliards en 2019. L'Amérique du Nord est le principal marché à ce jour, suivi de l'Europe de l'Ouest. L'Asie est actuellement moins équipée, mais, au vu des efforts développés principalement en Chine, l'écart avec le vieux continent devrait se réduire.

Demande mondiale d'imprimantes 3D

WORLD 3D PRINTING DEMAND (million dollars)					
Item	2007	2012	2017	% Annual Growth	
				2007-2012	2012-2017
3D Printing Demand	775	1950	5000	20.3	20.7
North America	361	900	2285	20.0	20.5
Western Europe	194	495	1225	20.6	19.9
Asia/Pacific	183	445	1170	19.4	21.3
Central & South America	7	25	75	29.0	24.6
Eastern Europe	13	35	103	21.9	24.1
Africa/Mideast	17	50	142	24.1	23.2

Figure 7 – D'après Freedonia. (2013). *World 3D Printing : Additive Manufacturing*. Cleveland, OH.

L'industrie d'AM est composée de deux marchés distincts. D'un côté ce qui a trait à la production et à l'industrie : le monde médical, aéronautique, automobile, etc. De l'autre, les applications tournées vers le consommateur final. On y retrouve des aspects relatifs à la mode, la décoration, le divertissement, etc. Une autre tendance se dessine, c'est à dire l'adoption de technologies grand public par les entreprises désireuses de se familiariser avec la technologie sans devoir investir de larges sommes. La croissance la plus importante à court terme sera générée par le segment des particuliers (Basiliere et al., 2013).

En 2012, Wohlers Associates considérait que les machines utilisant des thermoplastiques étaient les plus vendues avec une approximation de 30.000 machines en circulation. Le parc d'imprimantes travaillant le métal est porteur de croissance, mais moins représenté avec 500 unités seulement (Agarwala et al., 2012). De plus, un doublement annuel, entre 2015 et 2018, du parc de machines est attendu (Gartner, 2014). Cette énorme croissance est due à l'adoption massive de l'impression 3D par extrusion de matière (FFF et FDM – voir « Techniques de l'impression 3D »). Cette technologie est portée par l'arrivée de nombreuses entreprises – dont un grand nombre lèvent leurs capitaux via le « crowdfunding » – qui profitent des expirations de brevets des leaders actifs depuis des décennies. Durant les trois années à venir, les dépenses des utilisateurs finaux pour cette technique seront, selon Gartner (2014), de l'ordre de 6 milliards de dollars.

Marché des consommables

À l'instar de la tendance à la hausse qui se dessine nettement pour les imprimantes 3D, les consommables représentent aussi un marché en expansion. Ces consommables sont les pièces de rechange (têtes d'extrusion, plateaux chauffants, matériaux d'impression, etc.). MarketsandMarkets estime que le marché en 2019 atteindra un chiffre d'affaires global de 1,052 milliards de dollars. D'ailleurs, le taux de croissance des consommables est estimé à 20,4% d'augmentation annuelle jusqu'à cette date (Martel, 2014).

Une distinction est à faire entre les différents types de matière. Les plastiques sont actuellement les plus représentés et les plus vendus, portés par la consommation des particuliers. Cette tendance semble se prolonger dans la durée, ils devraient représenter 64% du marché en 2019 avec une valeur de 671 millions de dollars. Les métaux représentent la deuxième classe de matériaux avec le plus haut taux de croissance, dû à leurs avantages en termes de propriétés physiques. Les autres produits nécessaires à l'impression 3D, comme les programmes de modélisation et de 'slicing', ainsi que les produits associés, comme les scanners tridimensionnels, vont connaître un taux de croissance similaire à celui des matières d'impression. L'Amérique du Nord est la région la plus demandeuse en terme de consommables et possède la plus grande capacité de production pour y répondre. Cette particularité devrait se maintenir dans le temps pour la prochaine décennie. La moitié de la demande mondiale est réalisée par l'Europe et l'Asie.

Les fournisseurs de consommables représentent un marché modérément fragmenté. Les principaux acteurs (i.e. 3D Systems and Stratasys) sont aussi présents sur ce marché et capturent, avec deux autres firmes européennes (i.e. Arcam AB et ExOne GmbH) la majorité des parts de marché. De nouveaux acteurs font néanmoins leur arrivée sur le marché et défraient parfois la chronique en proposant à la vente des matériaux avec de nouvelles propriétés comme du plastique conducteur, magnétique, etc (Marketsandmarkets, 2014).

CHAPITRE A : Hype Cycle

Un ‘hype cycle’ est une représentation du développement de technologies. Celles-ci sont placées sur une courbe en fonction de leur visibilité, des successions d’étapes nécessaires à leur développement et ce qui a déjà été réalisé. Cinq phases décomposent l’abscisse :

- Le lancement de la technologie, à l’extrême gauche du graphe, représente l’arrivée sur le marché de la technologie. À ce stade, elle n’est pas encore aboutie et très balbutiante. Elle suscite néanmoins un intérêt.
- S’ensuit un pic d’espérances excessives, dû à une grande couverture médiatique de la technologie et l’arrivée de multiples entreprises dans le secteur.
- L’euphorie retombe ensuite suite au déséquilibre entre la réalité et les réponses déçues aux espoirs exagérés. Le nombre de sociétés actives est en déclin.
- La technologie n’est cependant pas abandonnée par tous et des améliorations progressives lui sont apportées. Les applications et avantages offerts commencent à être cernés rationnellement. Le marché se consolide.
- Finalement, dans la dernière phase, appelée le plateau de productivité, la technologie est au point et voit ses applications élargies. Celles-ci sont plus ou moins nombreuses et ne peuvent concerner qu’un marché de niche selon la technologie (Fenn & Raskino, 2008).

Technologies émergentes

La reconnaissance vocale, les scanners 3D, la réalité augmentée, le Big Data, l’Internet des objets, les voitures autonomes et les ordinateurs quantiques sont toutes des technologies reprises dans l’étude de Gartner de 2014 qui agrège ces technologies émergentes. Au même titre que l’impression 3D et d’autres, ces technologies sont considérées comme potentiellement adoptables par le public dans le futur, avec des périodes variables allant de moins de deux ans à plus d’une dizaine d’années.

Trois références sont faites à l’impression 3D. La première concerne les systèmes de bioprinting tridimensionnels que la firme estime être encore dans la phase ascendante du cycle. Il faudra encore entre 5 et 10 ans avant d’arriver au plateau, c’est à dire son

adoption plus globale. Cette technologie est un domaine de recherche pour de nombreuses universités et laboratoires de recherche. Les applications médicales promettant de belles avancées pour le soin des patients (i.e. greffes sur mesure, création d'organes, etc.).

Hype Cycle de Gartner sur les technologies émergentes



Figure 8 – D'après Gartner. (2014). *Gartner's 2014 hype cycle for emerging technologies maps the journey to digital business*. En ligne sur le site de Gartner <http://www.gartner.com/newsroom/id/2819918>, consulté le 2 mai 2015.

L'impression 3D pour les particuliers est la deuxième évocation relative aux technologies 3D. Elle vient de franchir le sommet du pic d'espérances excessives et va connaître un essoufflement. Il y a effectivement eu beaucoup de spéculations à son égard et les médias l'ont très souvent présentée comme une révolution imminente. De très nombreuses sociétés occupent déjà le marché et de nombreuses autres s'y lancent. Une nouvelle tendance voit d'ailleurs le jour ; le crowdfunding. Kickstarter, le leader de ce type de financement alternatif, a connu une explosion du nombre de campagnes de financement ayant trait à l'impression 3D (près de 300 projets ayant trait à l'impression 3D recensés au 1^{er} juin 2015). En 2014, une douzaine de machines ont pu voir le jour grâce au soutien des internautes. Les cinq campagnes les plus réussies pour le financement d'imprimantes 3D ont connu un investissement moyen de 1.391.733\$. De

nouveaux fabricants ont ainsi pu entrer dans la course en proposant généralement des prix bien inférieurs à ceux déjà pratiqués – parmi les cinq campagnes évoquées plus haut, quatre offraient des machines sous les 300\$ (Hensley, 2014).

Le marché des impressions 3D en entreprise constitue la dernière référence à la technologie 3D. Cet aspect sera étudié dans la section suivante (Chapitre C, Section 2).

Sans faire partie du noyau dur de technologies d'impression 3D, les scanners tridimensionnels sont également cités comme proches de la phase de plateau. Les outils de numérisation du monde physique vers le digital ont un lien évident avec l'impression 3D, car ils permettent de dupliquer des objets via l'impression 3D. L'impression 3D et le scanning 3D sont deux technologies complémentaires qui bénéficient de leurs avancées mutuelles.

L'impression 3D

Dans sa publication de 'hype cycle' relatif à la 3D, Gartner prévoit des temps d'adoptions différents en fonction des technologies et des usages. Les produits, services et techniques les plus aboutis sont les scanners 3D, les services d'impression 3D, l'impression professionnelle, les logiciels de création de modèles et les appareils médicaux. Ceux-ci devraient avoir trouvé leur formule viable et être plus largement répandus sur le marché d'ici cinq ans maximum (Gartner, 2014).

En allant plus dans le détail, il est évident qu'il existe une distinction entre les impressions 3D et ses usages dans le monde privé et l'industrie. D'un côté, les particuliers seront amenés à pouvoir réaliser leurs propres impressions tridimensionnelles chez eux comme ce fût le cas avec les photographies digitales (Business Wire, 2012). Cela concernera de petits objets ; des jouets, des articles ménagers légers, etc. L'impression tridimensionnelle grand public nécessite, selon l'estimation, encore 5 à 10 ans de développement avant d'être intégrée dans les usages. Pour le moment, l'engouement commence à retomber et une certaine désillusion quant aux promesses faites par la technologie s'installe. La phase suivante sera le retour de la confiance, avec une croissance moins rapide, suite aux améliorations apportées à la technologie. Ne resteront alors que quelques entreprises qui agiront avec prudence et deviendront rentables. L'impression 3D grand public aura besoin d'une décennie pour être adoptée

massivement explique Pete Basiliere, vice president des recherches chez Gartner : « Aujourd'hui environ 40 fabricants vendent les imprimantes 3D les plus utilisées dans le business, et environ 200 startups dans le monde développent et vendent des imprimantes 3D aux particuliers, coûtants juste quelques dollars. Néanmoins, ce prix est actuellement trop élevé pour la majorité des consommateurs, bien qu'une connaissance de la technologie existe et que la technologie bénéficie d'un intérêt de la part des médias » (Gartner, 2014).

Hype Cycle de Gartner sur les impressions 3D

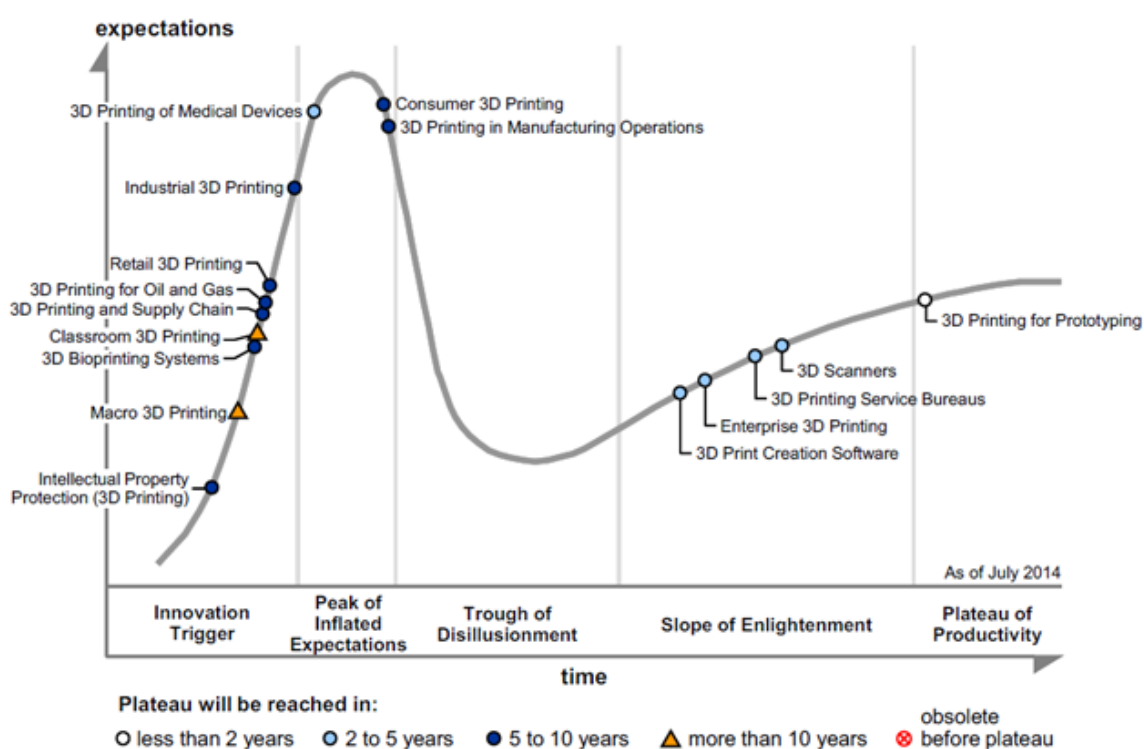


Figure 9 : D'après Gartner. (2014). *Gartner says consumer 3d printing is more than five years away.* En ligne sur le site de Gartner <http://www.gartner.com/newsroom/id/2825417>, consulté le 2 mai 2015.

D'un autre côté, le marché de l'impression 3D en entreprise représente un marché fort différent. De par ses applications et les technologies, une séparation de plus en plus nette se marque entre ces techniques et l'impression pour particuliers. Au départ pourtant l'adoption a été lente et s'est faite via des offres grand public, laissant aux firmes la possibilité d'apprendre et de découvrir les usages de la 3D dans leur business avec un risque minimum et un capital investi faible (Gartner, 2014).

CHAPITRE B : Adoption de l'impression 3D

L'adoption de technologies nouvelles par des consommateurs est une question de recherche marketing ayant déjà eu droit à beaucoup de travaux. Les ordinateurs et le fait qu'ils puissent accéder au web, les imprimantes, les jeux vidéo, la photographie, etc. ont tous fait l'objet d'études relatives à leur adoption par des particuliers et des entreprises. De nombreux chercheurs se sont également intéressés à la question dans d'autres domaines de recherche, notamment en psychologie et sociologie. L'adoption est un des concepts les plus anciens et les plus étudiés dans la littérature de diffusion d'innovation (Eveland, 1979). Ce terme peut faire référence à plusieurs choses : un processus, un événement, un état ou une combinaison de ceux-ci (Zenobia, 2008). Rogers (2003) définit ce terme comme « la décision de faire un plein emploi d'une innovation comme la meilleure solution disponible ». Le processus de décision d'adoption de technologie connaît plusieurs variantes. Il est admis que la plupart des modèles utilisent le théorème de phase, c'est à dire, une succession d'étapes amènent à une décision finale (Witte et al., 1972).

La diffusion d'une technologie nouvelle a toujours intéressé les milieux académiques et économiques. Elle est le résultat de l'agrégation de décisions personnelles d'adoption. Bien qu'une technologie puisse parfois être apparue à un moment donné, son intégration dans la vie des gens est diffuse et adopte un rythme plutôt lent (Hall & Khan, 2003). La croissance économique peut être boostée, entre autres, suite à la diffusion massive d'une innovation. Cela peut engendrer des changements organisationnels (Fagerberg & Godinho, 2003 ; Osterman, 2000), l'amélioration de technologies concurrentes de la nouvelle solution (Rosenberg, 1972), une amélioration continue de la technologie (Rosenberg, 1972 ; Hall, 2003) et la mise en place et le développement d'alternatives ((Rosenberg, 1972; Caselli and Coleman II, 2001). Mais sa diffusion est le résultat d'une succession, en séquence ou continue, d'évènements (Rosenberg, 1972). La séquence d'évènements comporte trois étapes principales : la conception initiale, l'innovation et l'adoption. L'innovation porte l'idée initiale à un stade de commercialisation et l'adoption sur les usagers potentiels. Au plus le coût-bénéfice de l'adoption est élevé pour un utilisateur, au plus il sera susceptible de choisir la nouvelle solution. Attention toutefois à prendre en compte des niveaux d'utilité différents selon les

individus et leurs usages ainsi que les éventuelles variantes de la technologie (Hall & Khan, 2003).

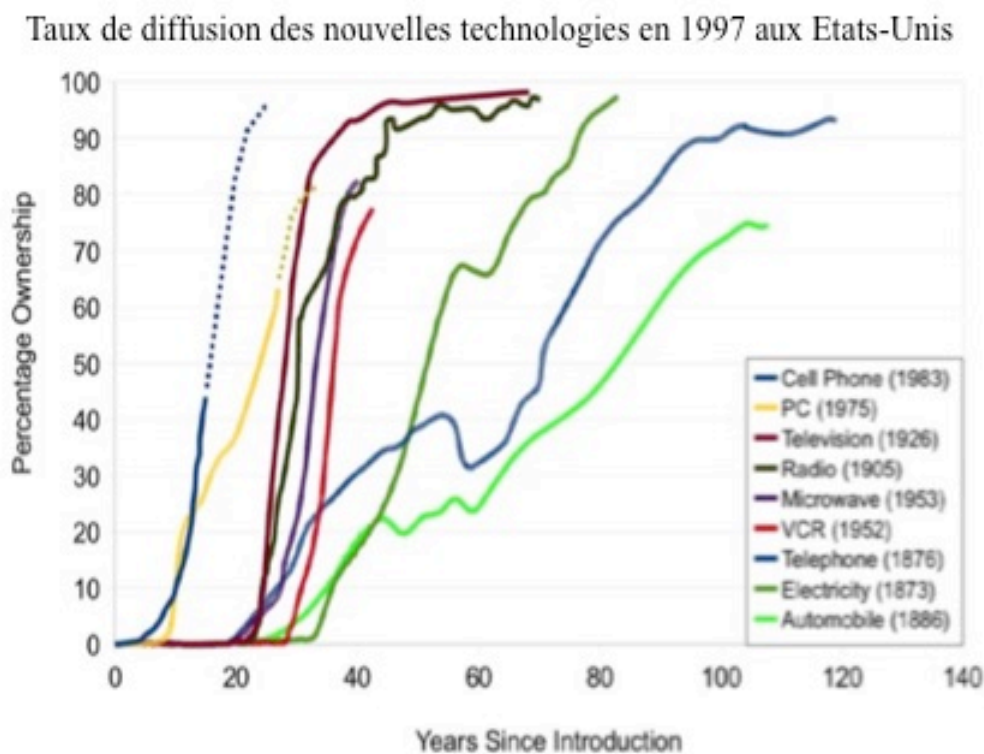


Figure 10 – D'après Paque, B. & Coeurderoy, R. (2015). *Principes et définitions de l'innovation dans les entreprises*. Cours de Management stratégique de la technologie et de l'innovation. UCL.

Il existe nombre d'études sur le sujet montrant des taux d'adoption différents en fonction des technologies, d'où l'intérêt de réaliser une analyse à chaque nouvelle innovation. Une représentation graphique du taux d'adoption d'une nouvelle technologie prend généralement la forme d'une courbe en S (voir figure 10). Il y a, au début, un taux faible d'adoption qui s'accélère au cours du temps. Cela s'explique par un niveau accru de connaissance du produit (Khan, 1995). La courbe arrive à un équilibre une fois le marché saturé. Le temps entre les différentes phases d'adoption d'une technologie peut varier fortement d'un produit à l'autre. Cela s'illustre, par exemple, par des vitesses d'adoption relativement lentes pour des ordinateurs par les particuliers et le rapide engouement pour les DVD.

Une segmentation par type d'utilisateurs est aussi une bonne façon d'analyser la distribution de la technologie dans la société. Typiquement il existe cinq profils de personnes face à une nouvelle technologie. Elles se répartissent en fonction de leur

vitesse d'adoption d'une technologie. Les innovateurs représentent la première classe, suivie des « early adopters ». S'en suit la majorité des individus, elle aussi divisée entre la majorité précoce et la majorité tardive. Finalement, les retardataires forment le dernier groupe (Paque & Coeurderoy, 2015). Pour Pete Basiliere, directeur de recherches chez Gartner (2013), l'impression 3D est une technologie qui commence par être adoptée par une majorité précoce de particuliers. La baisse de prix aidera la croissance de ce marché.

Pour les industriels, l'impression 3D est déjà largement utilisée parmi les grands acteurs de certains secteurs comme l'automobile, militaires, médicaux et pharmaceutiques, etc. Les plus petites entreprises commencent à investir dans de l'équipement AM au fur et à mesure que les prix décroissent.

Technologie disruptive

Certaines voies se font entendre et clament que l'impression 3D représente une rupture nette face aux méthodes de fabrication classiques et que, comme l'ordinateur ou Internet avant elle, il y aura un avant et un après. C'est du moins ce à quoi l'on peut s'attendre si l'impression 3D est bien une incarnation de technologie de rupture (ou disruptive). Identifier ce genre de technologie est parfois difficile, car les nouveautés n'apparaissent pas toutes comme porteuses de changement. Christensen (1997) explique que les technologies de rupture – comme toutes – ne sont pas directement perçues comme telles, car balbutiantes. Les industries prennent conscience de leur potentiel et les adoptent éventuellement lorsqu'elles sont plus abouties façon aux technologies traditionnelles.

McKinsey (2013) propose de s'appuyer sur quatre facteurs déterminants pour identifier les technologies disruptives. Le premier étant la capacité de la technologie à démontrer un taux de changement rapide en terme de prix/performance par rapport à des substituts. Il faut également que la technologie soit adoptée par un large éventail d'industries et de firmes. Pour atteindre cet objectif, il faut offrir une large gamme de produits ou services adaptables à leur usage final. La nécessité de porter intrinsèquement un grand potentiel économique est le troisième facteur d'analyse. Finalement, la possibilité d'altérer la façon dont les gens vivent et travaillent, de sorte qu'il y ait un avant/après, est le dernier critère d'évaluation (p3.).

Les analystes de la firme de consultance ont, grâce à leur méthode, pu identifier une douzaine de technologies avec des impacts économiques potentiellement disruptifs. À

côté de l'impression 3D, sont cités l'Internet des objets, le « cloud », la robotique avancée, etc. Une interaction existe entre elles et le développement de l'une peut avoir un impact sur celui d'une autre. Dans le cas de l'impression 3D, l'essor du « cloud » et des écosystèmes en ligne, par exemple, aura un effet potentiellement bénéfique (Lipson & Kurman, 2013).

« Tout comme le moment où le Homebrew Computer Club a été fondé en 1975, la société est maintenant à une période où une nouvelle rupture technologique est en train de naître: l'impression 3D »

(Grynol, 2013).

Les technologies disruptives affectent la société et l'économie si elles sont adoptées. Ainsi, pour l'impression 3D, les implications sur les individus et la société peuvent être importantes. Si les machines 3D sont largement utilisées, cela pourrait avoir un impact sur les modèles de consommation et la nature du travail. Une connaissance particulière est requise pour faire fonctionner correctement les appareillages. En remplaçant certains aspects du travail humain devenus inutiles ou non compétitifs, la main-d'œuvre doit évoluer afin de s'appropriier les nouveaux outils de production. L'impression 3D permet de se passer de travailleurs aux tâches peu productives, mais nécessite du personnel qualifié pour la conception des modèles, le calibrage des machines et leur entretien, etc. Cela aura un impact sur les emplois et plus largement sur l'économie.

L'impression 3D permet, et cet effet sera amplifié si elle est largement embrassée, la création de nouveaux produits et services. Les produits peuvent être nouveaux de par leur design qui était impossible à obtenir précédemment ou peuvent être introduits sur le marché plus facilement grâce aux plus faibles investissements nécessaires pour la mise sur le marché. Il faut s'attendre également à un déplacement des surplus générés du producteur vers les consommateurs.

Le taux de croissance et la productivité d'une économie nationale sont susceptibles de ressentir les effets de l'adoption de l'impression 3D à large échelle. Cela aura aussi comme conséquence un rééquilibrage en terme d'avantages comparatifs entre les nations qui ne sont pas équipées de manière égale face à cette nouvelle technologie. Cela propose un nouvel éclairage pour les pays en développement. Offrant d'un côté aux sociétés locales la possibilité d'innover à moindres coûts et de l'autre d'améliorer la

qualité de vie des populations profitant de cette aubaine économique (Ishengoma & Mtaho, 2015).

Adoption en entreprise et le modèle des quatre voies

L'intégration de méthodes d'impression 3D dans une chaîne de production peut être plus ou moins profonde selon les cas. Deloitte insiste sur ce fait et a élaboré des scénarios qui peuvent être classés en fonction des changements qu'apporte l'impression 3D sur les produits et sur la chaîne de production. Cela peut alors prendre la forme d'une matrice simple – voir figure 11 (Cotteleer & al., 2014).

Quatre scénarios sont possibles suite à l'adoption d'équipement d'AM :

- La première possibilité d'adoption de l'impression 3D n'implique pas de changement radical au sein de l'entreprise. Les produits offerts et la chaîne de production restent identiques. L'impression 3D est utilisée dans de faibles proportions par rapport aux méthodes traditionnelles, dans un but exploratoire. Son utilisation pour du prototypage rapide en est un bon exemple.
- Pas de changements sur les produits, mais bien dans la chaîne de production, telles sont les caractéristiques du deuxième scénario. L'entreprise intègre les économies que peut amener l'impression 3D pour diminuer ses coûts. Cela permet, par exemple, de limiter le stock nécessaire et de produire à la demande. Cela ajoute de la flexibilité et de la réactivité au sein des activités.
- La troisième possibilité d'intégration consiste, pour une entreprise, à saisir les opportunités de changement de sa chaîne de production sans modifier son offre de produits. De plus grandes performances peuvent être libérées suite à l'utilisation de machines d'AM. Les produits peuvent connaître des innovations. Une illustration de ce dernier point consisterait à la possibilité de personnaliser le produit plus finement par rapport aux attentes des clients.
- Finalement, le quatrième scénario va plus loin que les précédents en apportant des modifications à la fois aux produits et à la chaîne de production. Les changements sont ici radicaux et bouleversent complètement le « business model » mis en place.

Modèle des quatre voies



Figure 11 : D'après Cotteleer, M. & Joyce, J. (2014). *3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth*. Deloitte Review.

CHAPITRE C : Domaines d'application industriels

L'impression 3D est déjà utilisée par certaines industries avec des usages parfois fort différents. L'amélioration des technologies et la baisse de leurs coûts ont développé ses applications commerciales. Les possibilités de produire un objet fini directement depuis son modèle digital, en passant éventuellement des étapes de la production traditionnelle, ont séduit industriels et particuliers. La chaîne de production ainsi que la gestion des stocks peuvent connaître des bouleversements plus ou moins profonds lorsque l'impression tridimensionnelle est utilisée pour produire à la demande. Les impacts sur la quantité de matériaux utilisés peuvent aussi avoir un impact – notamment dans les industries à forte production de déchets. La possibilité de réaliser des designs jusqu'alors inaccessibles peut également être un facteur de motivation d'adoption de la technologie. Certaines applications attendent encore d'être découvertes et pousseront de nouveaux secteurs à s'approprier les techniques.

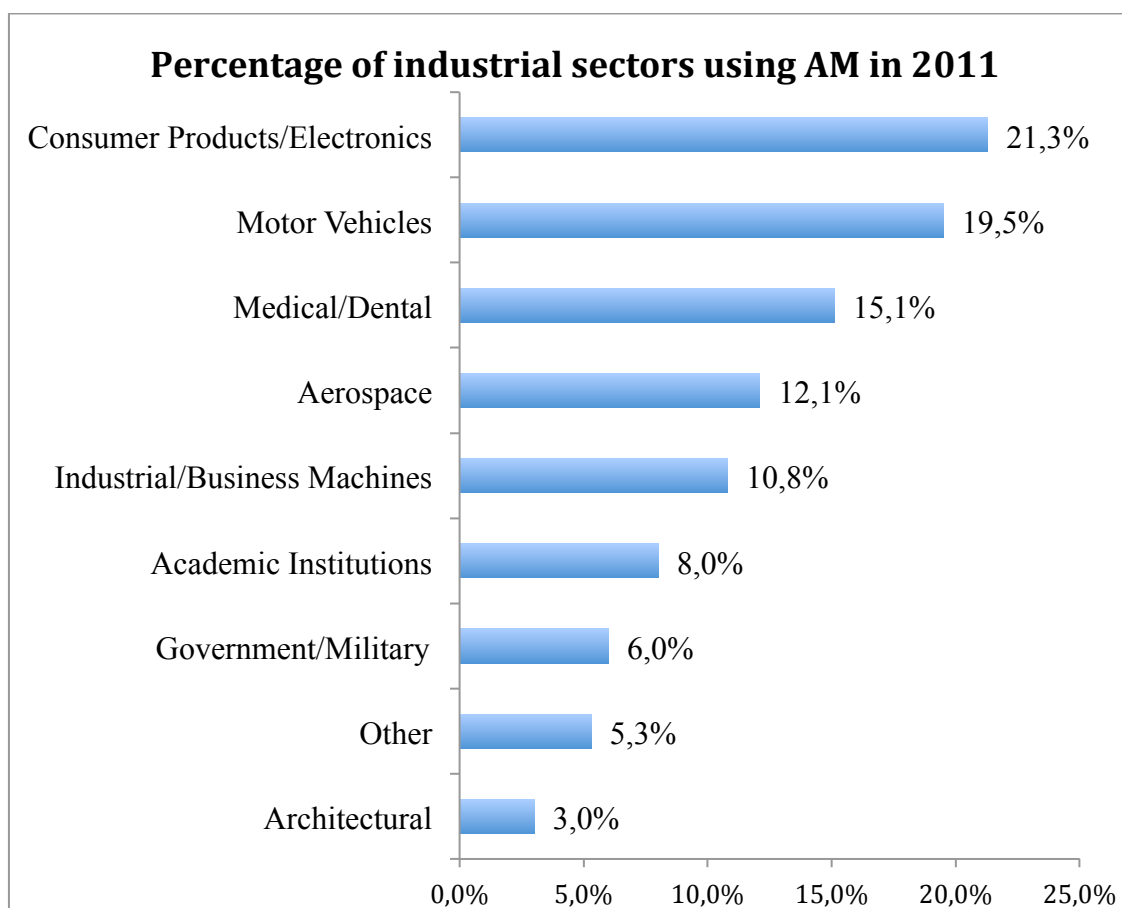


Figure 12 : D'après Agarwala, M., Andreev, Y. et al. (2012). *Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry; Annual Worldwide Progress Report*. Fort Collins, CO : Wohlers Associates.

Les analyses sur l'impression 3D et leurs domaines d'application ne s'accordent pas toujours sur leur répartition entre les secteurs. Ceux-ci diffèrent d'ailleurs d'une étude à l'autre. C'est, par exemple, le cas lorsque l'aérospatiale et l'aérien sont abordés. Parfois les usages militaires sont inclus dans les statistiques, parfois pas.

Répartition entre secteurs et application de l'impression 3D

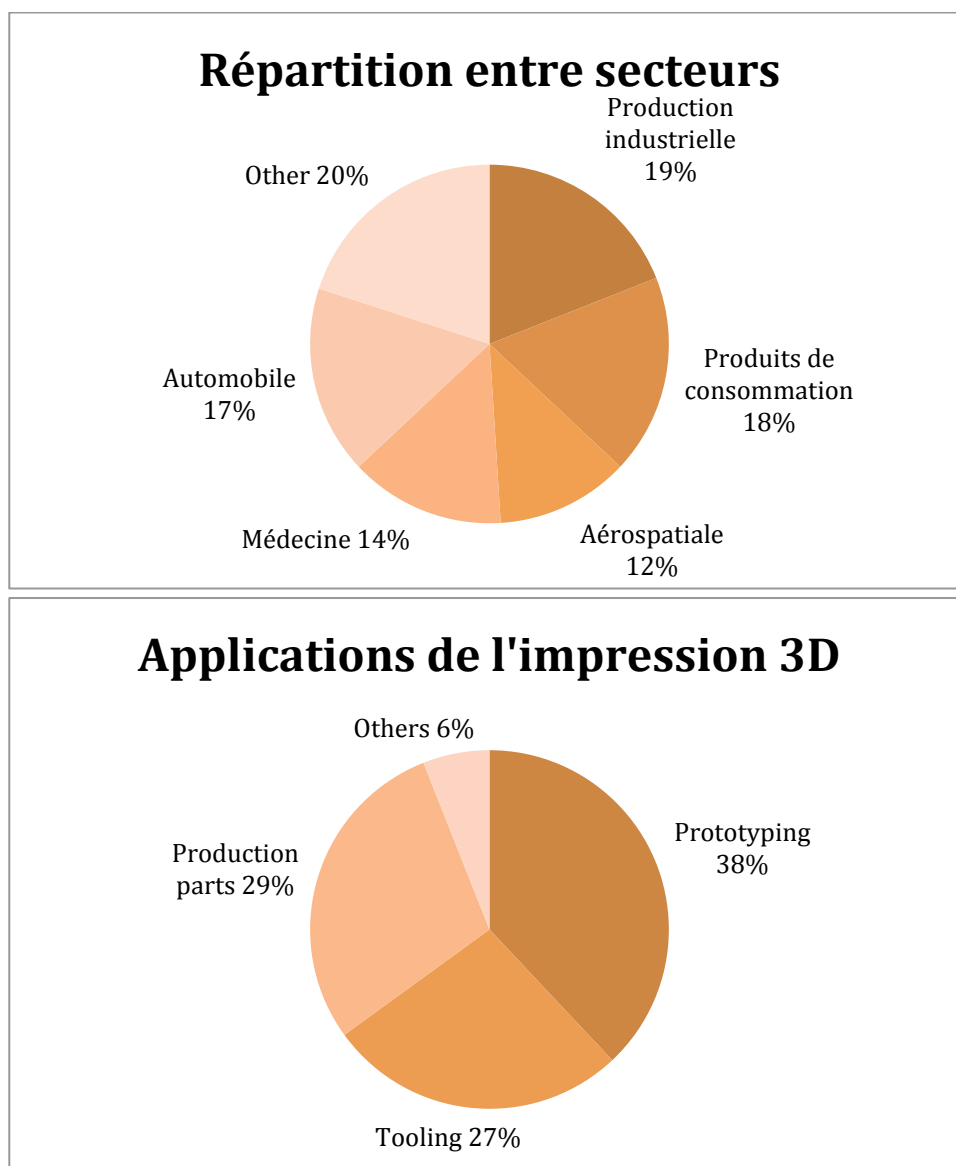


Figure 13 : Basée sur les recherches de Cotteleer, M., Holdowsky, J., & Mahto, M. (2014). *The 3D opportunity primer: the basics of additive manufacturing*. Westlake, TX : Deloitte University.

L'objectif de ce chapitre est donc de présenter les différents domaines d'application de l'impression 3D dans des secteurs variés, mais il faut garder à l'esprit qu'ils évoluent vite et la répartition mouvante entre les secteurs d'activités est donnée à titre indicatif.

Outillage

De nombreuses industries ont déjà adopté l'impression 3D pour la fabrication d'outillage spécifique à leur secteur. C'est le cas pour le secteur automobile, l'aérospatial, les produits industriels, des produits de consommation et de santé (Cotteleer & al., 2014). Le marché de l'AM dédié à cet usage représentait 1,2\$ milliards en 2012. Actuellement, les méthodes traditionnelles restent ultra majoritaire, cependant, l'amélioration de la technologie AM et ses coûts en diminution aidant, l'impression 3D gagne de nouvelles applications. Cette approche ne révolutionne pas la gestion de la chaîne logistique, mais la perfectionne. Des outils pour le coulage (i.e. des moules), les processus d'usinage, les gabarits de montage et autres sont autant d'applications couvertes par l'AM d'outillage. Chacune faisant appel à des matériaux spécifiques à son usage (Hiemenz, 2013).

Les avantages de l'AM pour cette application à l'outillage sont multiples. Premièrement, cela peut amener à une **diminution du temps de fabrication de l'équipement**, dans un ordre de grandeur compris entre 40 et 90%. Ces résultats s'expliquent par le besoin de main-d'œuvre inférieur et la simplicité induite par la gestion de fichiers numériques tridimensionnels. De plus, la production de matériel de support nécessaire à l'activité d'une firme se fait en interne. Il n'y a plus, ou en tout cas moins, de dépendance vis-à-vis d'acteurs extérieurs à l'entreprise. Le risque induit par les tiers est donc réduit. Deuxièmement, comme le premier point renforçant l'attractivité de l'AM par rapport aux méthodes traditionnelles, **la réduction des coûts** est importante. La diminution du gaspillage, en générant moins de déchets lors de la production (virtuellement zéro), permet de produire l'outillage avec moins de matière première et avec, éventuellement, moins de main d'œuvre nécessaire du fait de l'automatisation des processus de l'impression 3D. Finalement, les outils réalisés grâce à l'impression 3D peuvent bénéficier d'une **fonctionnalité améliorée**, en utilisant des géométries plus complexes par exemple, et la **flexibilité du processus** de création permet une personnalisation éventuelle (Campbell & al., 2011).

Bénéfices de l'impression 3D pour l'outillage

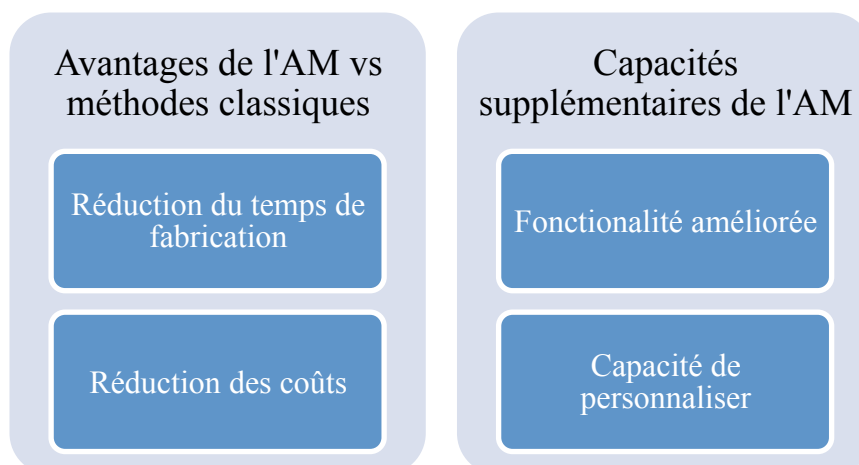


Figure 14 : Basée sur les recherches de Cotteleer, M., Crane, J., & Neier, M. (2014). *3D opportunity in tooling*. Westlake, TX : Deloitte University.

Automobile

Les équipementiers automobiles et leurs fournisseurs ont adopté depuis plus d'une décennie les techniques d'impression 3D. Parmi les premières entreprises à avoir adopté cette technologie, il faut citer Ford, BMW et Tesla Motors (Heller, 2014). L'impression 3D est déjà bien implantée et cela transparaît dans les chiffres. Le marché de l'AM dans l'industrie automobile représentait 267\$ millions au début 2015 – 168\$ millions étant dédié aux machines, le reste aux consommables (Terdiman, 2015). Scott Dunham, un analyste de SmartchMarkets, prévoit une croissance du marché importante pour 2019. En 2019, il devrait atteindre les 1,1\$ milliard (Dunham, 2014).

L'AM est utilisé pour fabriquer des pièces au design complexe difficilement obtenues par des méthodes traditionnelles. De plus, il est possible d'y inclure des fonctionnalités intégrées telles que des circuits électriques intégrés, un poids moindre tout en garantissant la solidité de l'objet via une structure en croisillons ou en nid d'abeilles (Lynskey & White, 2013). Le coût de manutention est donc revu à la baisse. « Les processus d'AM jouent un rôle important dans la création de véhicules du futur plus rapides, plus sûrs, plus légers et plus efficaces » indique un rapport de Deloitte sur le secteur (Gangula & al., 2014).

Déjà fortement automatisé, le secteur connaît une modification de sa chaîne de production en incluant l'impression 3D. De par la nature même de ce processus de

création d'objets finis, les besoins en outillage sont réduits. Les étapes de production peuvent être raccourcies, diminuant de facto le temps total nécessaire à la production des véhicules.

« Pour l'industrie automobile, ces avancées ont ouvert des portes pour les nouveaux modèles; des produits plus propres, plus légers et plus sûrs; des délais plus courts; et des coûts réduits »

(Gangula & al., 2014).

Plus anecdotique, un véhicule composé à plus de 50% de pièces imprimées – la Urbee 2 – a vu le jour aux États-Unis. L'objectif était de démontrer qu'une telle opération était possible et de susciter l'intérêt du public (Miller, 2013).

Défense

Représentée presque exclusivement par l'adoption de machines 3D par la défense américaine, l'impression 3D a fait son entrée dans le monde militaire. Cela est le fruit d'une réflexion de l'état-major concernant le coût de maintenance des équipements (véhicules tactiques, avions, missiles, flotte, équipement de support, etc.), leur réduction potentielle et d'autres usages – notamment via le programme « Print the fleet ». En 2011, les États-Unis allouaient 711\$ milliards à leur armée (Stockholm International Peace Research Institute, 2012). 44% du budget était alloué aux opérations de maintenance (Joyce & al., 2014). Il est prévu que chaque base principale soit équipée d'imprimantes 3D afin de pouvoir assurer sur place une relative autonomie par rapport aux fournisseurs. Cela permet aussi d'avoir une production hautement personnalisable pour des éléments produits en faible volume et nécessaires à de l'équipement non centralisé (Tribot, 2013). De par l'aspect stratégique que représente le marché militaire, les barrières à l'entrée sont très élevées. En conséquence du faible nombre d'acteurs présents, le temps de production est relativement long et les coûts de transport élevés. De plus, les stocks sont importants et génèrent beaucoup de gaspillage (Smith, 2014).

Aérien et aérospatial

En parallèle des utilisations de l'impression 3D dans le monde de la Défense, les secteurs de l'aéronautique et de l'aérospatial ont également été des « early adopters ». De cette adoption précoce, ils ont une avance relative par rapport à d'autres secteurs et l'AM

permet déjà des applications abouties. En premier lieu, l'impression 3D est utilisée pour la réalisation de concepts et de prototypes ainsi que la fabrication en petite série de pièces complexes. Tout comme pour la Défense, l'impression de pièces de remplacement est aussi utilisée (Cotteleer & al., 2014).

L'espace connaît aussi l'impression 3D. La station spatiale internationale ayant, depuis septembre 2014, été équipée d'une machine capable de fonctionner en l'absence de gravité terrestre. Les astronautes ont été en mesure d'imprimer un outil dont le modèle numérique fut envoyé depuis un centre de la Nasa. Un tel équipement permet d'alléger le matériel nécessaire dans les fusées et de diminuer la consommation gigantesque de carburant nécessaire pour s'arracher à la gravitation terrestre. Dans un horizon plus lointain, Niki Werkheiser, chef de projet pour la Nasa, annonçait que « L'utilisation d'une imprimante 3D dans l'espace ouvre la voie à de futures expéditions spatiales à long terme » (Blin, 2014).

Ce n'est pas le seul projet qui intéresse les responsables de programmes aérospatiaux. En plus des avantages expliquant l'usage de l'AM en aéronautique dont ils tirent déjà parti, certains rêvent déjà d'utilisations dédiées à la colonisation de Mars (Gholipour, 2013), à la création de repas variés (Nasa, 2013), de modules lunaires (ESA, 2013), etc.

Médical

Le monde médical a été un des pionniers de l'impression 3D. La nécessité de personnaliser au mieux les soins des patients pour améliorer l'efficacité des traitements a conduit naturellement le secteur vers les possibilités offertes par l'AM. Le secteur représentait 16,4% du marché de l'impression 3D en 2012 (Wohlers associates, 2013). Il est lui-même divisé en plusieurs sections en fonction des machines et des matériaux utilisés. La première catégorie, la plus aboutie, est composée des **équipements médicaux de petite taille**, réalisables avec des équipements d'AM traditionnels. Les aides à l'audition, les prothèses dentaires et certains implants chirurgicaux font partie de cette famille de produits (Cotteleer & al., 2014). La deuxième concerne les produits réalisés avec des machines spécialisées, généralement pour réaliser des **objets hors dimensions standard et/ou avec les matériaux spécifiques** (i.e. de grandes prothèses en titane). Finalement, la troisième catégorie regroupe le **bioprinting** (Guillemot, 2013). Du matériel biocompatible, des cellules et des supports de structure complexes sont autant de

domaines de recherche prometteurs. Grâce aux avancées déjà réalisées, des greffes de tissus, de peau, des os, une greffe vasculaire, de trachée sont autant d'opérations réussies. Une complexité additionnelle par rapport à l'AM traditionnel est induite durant les processus de fabrication – comme les types de cellules, leurs facteurs de croissance, etc (Murphy & Atala, 2014).

CHAPITRE D : Marché des particuliers

L'impression 3D destinée aux particuliers est une technologie d'une vingtaine d'années proposée maintenant à la vente. Il n'est pas rare de lire aujourd'hui des articles dans la presse relatant des avancées ou des utilisations de cette technologie. Des sept technologies formant la famille des imprimantes 3D, les machines fonctionnant par extrusion de matière (FFF et FDM) sont celles qui connaîtront le plus haut taux de croissance du fait de leur adoption grand public. Le début de la récente adoption par des particuliers de machines d'AM est en grande partie dû à une offre de plus en plus étendue dans des gammes de prix inférieur à 1000\$.

Les utilisations faites par les particuliers de machines d'AM sont variées, même si elles ne sont pas aussi diversifiées que dans le monde industriel. Même s'il est difficile d'avoir une estimation précise des taux d'usage par application, il est certain qu'actuellement les utilisateurs d'imprimantes 3D les utilisent principalement à titre de hobbies. Quelques applications plus spécifiques semblent pourtant se démarquer comme l'usage d'imprimantes tridimensionnelles pour la création d'accessoires de mode, des pièces de rechange, etc. L'achat de machines s'explique aussi par l'usage éducatif qu'en font leurs acheteurs. Ceux-ci achètent des imprimantes pour se familiariser avec la technologie et l'évaluer. Certaines écoles – tant techniques que générales – sont aussi demandeuses afin d'initier leurs élèves. Les fabricants l'ont très bien compris et beaucoup proposent des offres spéciales pour ce segment (souvent des machines vendues dans le commerce, mais avec du contenu de cours pour les professeurs et leurs élèves, des études de cas, etc.).

Le Maker Mouvement

Les 'Makers', terme popularisé par Chris Anderson dans son livre du même nom (2012), et le 'Maker Mouvement' qui les accompagne qualifie les individus qui ont un désir de fabriquer de leurs mains des objets qui avaient été laissés à la production de masse. La démocratisation des outils de fabrication, amplifiée par les effets d'Internet (communauté de 'Makers', tutoriels, logiciels open source, etc.), permet à ce mouvement de s'adresser à un public de plus en plus large. Une définition précise de celui-ci est difficile, mais l'idée principale derrière le terme de 'Maker' peut être « la génération du web créant des objets physiques plutôt que seulement des pixels sur un écran »

(Anderson, 2012). Le MIT Media Lab explique qu' « ils utilisent les atomes comme des bits – utilisant les outils puissants que sont les logiciels et l'industrie de l'information pour changer notre façon de créer des objets tangibles » (North Carolina Central University, 2015). Les 'Makers' sont des gens qui s'engagent de façon passionnée dans la création d'objets ce qui en fait plus que de simples consommateurs (Dougherty, 2012).

« Quand je parle du Maker Mouvement, je fais un effort pour rester à l'écart du mot 'inventeur' - la plupart des gens ne se considèrent pas comme ça. 'Maker', d'autre part, décrit chacun de nous, peu importe la façon dont nous vivons nos vies ou ce que nos objectifs peuvent être »

(Dougherty, 2012).

Trois facteurs rendent ce mouvement possible et expliquent pourquoi son émergence est récente. Premièrement, les outils de design et de production contrôlés par ordinateurs, bien qu'existant depuis des décennies, ont connu une miniaturisation et existe maintenant à une échelle pratique pour les particuliers. L'arrivée d'imprimantes 3D « de bureau » entre dans cette catégorie. Deuxièmement, les outils de création étant devenus informatisés, les fichiers sont facilement échangeables entre 'Makers'. Ceux-ci l'ont bien compris et tirent parti de nombreuses plateformes d'échange. Les pratiques issues du monde open source, nées avec les logiciels libres – sont facilement transposables au mouvement. La multiplication des initiatives de crowdfunding surfe sur ce nouveau modèle de partage. Troisièmement, la flexibilité accrue des possibilités de production rend le passage du monde numérique au réel plus facile. Il est devenu plus commode, la numérisation aidant, de faire produire ses designs. Alors qu'il était nécessaire, il y a une décennie de cela, d'avoir ses propres moyens de production industrielle ou de faire produire en masse pour être rentable, il est désormais possible de créer des lots en faible quantité.

Plateformes en ligne et services d'impression

L'émergence de sites Internet relatifs à l'impression 3D est une source d'information utile pour beaucoup de particuliers. Des communautés de plus en plus grandes font leur apparition en ligne, leurs membres partagent les designs qu'ils ont réalisés, s'échangent des conseils, s'entraident pour des projets et s'aident à résoudre

des problèmes logiciels ou sur leurs machines. Ces sites ont souvent leur identité propre. Certains feront la part belle à l'échange de designs et à la création de dérivés, d'autres à la gestion de projet ou à une offre de haute qualité.

Principales plateformes Internet d'échange 3D

Nom	Particularité
3D Warehouse	Propriété de Google, assez technique
Autodesk's 123D	Le site propose des tutoriaux et des designs
CGTrader	Les utilisateurs peuvent vendre et acheter des designs
Cubehero	Beaucoup d'interaction entre les utilisateurs
Cubify	Va de pair avec les imprimantes 3D Cube et propose des designs et du matériel
Github	Site pour des utilisateurs plus professionnels
MakerBot Digital Store	Designs de grande qualité
My Mini Factory	Teste les objets soumis et met en relation des utilisateurs qui peuvent imprimer contre rémunération
Thingiverse	Très grande communauté tournée vers le partage et la remodelisation
Youmagine	Les designs sont gratuits et tout le monde peut proposer ses créations

Figure 15 – Basée sur Bean, T. (2015). *Share and share alike: 9 places to find 3d printing designs*. En ligne <http://printspace3d.com/share-share-alike-9-places-find-3d-printing-designs-like-thingiverse/>, consulté le 7 juin 2015.

Les leaders présents sur le marché de l'impression 3D ont tous développé leurs plateformes, conscients de l'importance que peut avoir une communauté forte. Une certaine concurrence s'exerce donc aussi sur la toile. Il existe aussi des sites qui ne sont affiliés à aucun constructeur, mais ont réussi à capter une audience. Parmi les sites les plus aboutis, Thingiverse, une plateforme propriété de Stratasys, est la plus populaire actuellement en terme d'utilisateurs et d'objets proposés au téléchargement (fin juillet 2014, plus de 400.000 designs étaient recensés). Le site est financé par la publicité et est entièrement gratuit.

Il existe aussi des plateformes dont l'objectif est la mise en relation de designers et de possesseurs d'imprimantes 3D. Ces derniers peuvent, contre rémunération, réaliser

des objets sur base des modèles des designers. Le site Internet de ce type le plus connu est 3D Hubs, fondé en avril 2013 à Amsterdam. D'autres acteurs proposent un mélange des deux formules exposées plus haut. Ces plateformes mixent généralement du partage de fichiers avec des services d'impression. Elles mettent en relation des designers et des personnes avec une capacité de production. En plus de proposer des solutions d'impression aux particuliers, il existe des compagnies actives dans l'impression de modèles pour professionnels. Ces activités, en 2012, représentaient un marché de 798,4 millions de dollars (Wohlers associates, 2013). Deux raisons essentielles expliquent le besoin de ce genre de services tant pour les particuliers que les professionnels. La première est que la majorité des utilisateurs de services d'impression 3D n'a pas une grande connaissance des techniques utilisées et a besoin d'aide. Deuxièmement, les besoins 3D actuels des clients ne justifient pas d'investir dans de l'équipement et il est plus rationnel d'extérioriser le service. Le coût des impressions 3D diminuant dans le temps, cet avantage des services d'AM s'érodera progressivement (Smartech markets, 2013).

Expérience MyMiniFactory

Durant mon stage chez Ricoh Belgium, je travaillais à la création d'une offre 3D. J'ai donc été amené à rencontrer des personnes actives dans le secteur et à découvrir les services existants. C'est comme cela que j'ai découvert MyMiniFactory, une plateforme d'échange de modèles 3D. Sur mon temps libre, j'ai participé – et remporté – à deux concours de designs (l'annexe D montre un modèle). Cela m'a permis de me rendre compte de l'activité déjà abondante parmi un public encore relativement restreint.

CHAPITRE E : Perspectives de marché

La Consumer Electronics Association anticipe, dans son rapport annuel de 2012, une taille de marché approchant les 5 milliards de dollars en 2017 dû à l'augmentation de la demande globale. En 2018, le marché 3D atteindrait 6,9\$ milliards. Deloitte prévoit la vente de 220.000 machines fin 2015, ce qui représente une croissance de plus de 100% par rapport à 2014 (Lee & Stewart, 2015). La répartition de l'équipement entre particuliers et industriels n'est ici pas compartimentée, mais tous s'accordent à dire que la majorité des machines seront utilisées par des particuliers.

Au niveau de la répartition géographique, l'Amérique du Nord restera de loin le plus gros marché pour les technologies 3D, pesant 42% du marché global en 2017. Tout comme en Europe, la valeur du marché sera portée par des applications travaillant principalement le métal pour la production. Certains analystes prévoient une rapide progression de l'adoption de l'impression 3D en Chine, principalement pour des applications d'expérimentation, de prototypage et de design. Le gouvernement chinois a d'ailleurs financé un projet pour développer l'infrastructure 3D et sa connaissance à hauteur de 1,5 milliard de yuan.

Les perspectives de marché évoquées ci-dessous sont susceptibles de se réaliser si des efforts sont réalisés afin de rendre les technologies 3D plus compréhensibles et plus accessibles à une majorité. Il est nécessaire de sortir l'impression 3D du cercle encore très réduit de professionnels et de l'étendre à une plus grande population. Ceci sera l'objet de la section suivante de ce travail. (cf. Section 2).

Dans l'industrie

L'avènement de l'impression 3D dans les années à venir ne va pas bouleverser entièrement le paysage industriel. Les techniques de production classiques seront toujours majoritaires, mais les deux prochaines décennies seront marquées par la croissance rapide de l'AM. Il est évident qu'à l'avenir les applications dédiées à l'impression 3D vont aller croissante. Certains secteurs connaîtront les effets disruptifs apportés par l'AM. C'est le cas, par exemple, du secteur médical qui va connaître de profonds bouleversements une fois que le bio-printing sera viable commercialement. Certaines sociétés ont déjà investi le terrain, comme Align Technology qui propose des traitements orthodontiques en utilisant des méthodes de scanning et d'impression 3D. L'entreprise a enregistré des

revenus de 500\$ millions grâce à son système Invisalign (Grynol, 2013). Smartech prévoit une augmentation du nombre d'imprimantes 3D dans le secteur médical en 2020 d'environ 30.500 machines par rapport en 2015. D'autres secteurs – en particulier ceux évoqués plus haut dans ce travail – seront aussi impactés : l'automobile, l'aéronautique, l'aérospatial et l'industrie militaire.

Pour les particuliers

En 2017, il est estimé que 70% (195.300 unités installées à cette date) des machines 3D seront en possession de particuliers (Gartner, 2013), mais 90% de la valeur du parc mondial sera détenu par les entreprises utilisant des équipements industriels (Lee & Stewart, 2015). L'impression 3D ne sera pourtant pas dans tous les foyers, comme l'annonce Stewart Duncan, qui reste enthousiaste quant aux possibilités de telles technologies. L'explication est que la plupart des usages pour les particuliers seront toujours limités par leurs coûts face à ce que peut proposer l'industrie manufacturière classique. L'exemple donné est la fabrication d'une chaussure de sport, composée de plusieurs matériaux, elle est encore hors de portée d'une fabrication par AM. Même s'il était possible techniquement de réaliser un tel objet, son prix serait largement supérieur au prix de l'objet dans le commerce, réalisé avec des méthodes classiques. Il existe pourtant des usages qui peuvent être intéressants, principalement pour les hobbyistes capables d'utiliser les machines à leur plein potentiel. La diminution constante du prix moyen des imprimantes 3D pour les particuliers sera un facteur explicatif important pour son adoption. En 2017, il est estimé que le prix moyen tournera autour de 480\$. Cinq ans plus tard, ce nombre sera réduit à 253\$ (Lee & Ducan, 2012).

Les services d'impression 3D semblent avoir un bel avenir à moyen terme. Tout comme une tendance montante : les Fablabs. Ce sont des ateliers de petites taille ouverts au public et mettant à la disposition de celui-ci des outils de fabrication pilotés par ordinateurs. Parmi ces outils, l'imprimante 3D figure en bonne place à côté de découpeuses laser ou de fraiseuses gérées numériquement. Le programme des Fablabs est géré par le Center for Bits and Atoms du MIT. Leur nombre va grandissant, en juin 2015, 513 centres étaient recensés par la FabFoundation. L'Europe est le continent le mieux pourvu en installations de ce type avec plus de 270 Fablabs (la Belgique en compte huit). Cette tendance ne semble pas prête à s'essouffler.

SECTION 3 : DÉVELOPPEMENTS FUTURS

La troisième section de ce travail abordera le futur de l'impression 3D. Seront présentées ci-après les opportunités de développement les plus crédibles. Il est important d'insister sur la plausibilité, car il existe beaucoup de fantasmes quant aux possibilités qui seront amenées par des évolutions des technologies d'AM et le développement du marché. Les capacités de contrôle et le potentiel des machines d'AM sont considérés par beaucoup d'experts comme encore non aboutis. Il reste une grande place pour l'amélioration des techniques et de l'environnement 3D en général. De plus en plus, la production des imprimantes 3D, originellement pour du prototypage, va s'orienter vers la création d'objets finis.

CHAPITRE A : Les marchés

Les applications de l'AM, à la base utilisées exclusivement pour le prototypage rapide, sont de plus en plus nombreuses. Au fur et à mesure de leur maturation, les technologies d'impression 3D ont étendu leurs domaines d'application et les secteurs qui les utilisent. De l'équipement 3D est toujours utilisé pour du prototypage, mais également pour la fabrication d'objets. Ces derniers peuvent être nécessaires pour finaliser un processus de fabrication classique (avec des moules par exemple) ou être le modèle final – nécessitant éventuellement un post-traitement. Selon Deloitte, l'offre de produits finis proposés à la vente, issus d'un processus d'AM, sera toutefois toujours inférieure à 10% en 2017 (Lee & Ducan, 2012).

« Tandis que les imprimantes 3-D deviennent plus rapides, plus faciles à utiliser, manipulent plusieurs matériaux, et impriment des composants ou des systèmes actifs, elles vont trouver une utilisation au-delà du prototypage rapide »

(Boggeri, 2014).

L'arrivée sur le marché de l'impression 3D de grandes multinationales – comme HP, Canon ou Ricoh, par exemple – va avoir un impact important. Les stratégies suivies divergent parfois (distribution de machines tiers ou équipement propre) et il n'est pas impossible qu'ils décident d'acheter un fabricant existant pour intégrer sa technologie.

Précédemment dans ce travail, ont été décrits des secteurs utilisant l'AM (Chapitre C, Section 2). Il importe de présenter ici les changements qui vont survenir grâce aux améliorations des techniques et prédire les prochains secteurs influencés par l'AM.

Dans l'industrie

D'après un sondage réalisé en 2014 par PwC et ZPryme sur plus d'une centaine d'entreprises de production américaines, deux tiers utilisaient déjà l'impression 3D. La plupart possédaient un équipement bas de gamme et avaient réalisé un investissement minime afin d'expérimenter la technologie et de s'y familiariser ou pour réaliser du prototypage (Boggeri et al, 2014). Le nombre de sociétés désireuses d'intégrer la 3D dans leur chaîne de production devrait encore augmenter.

Néanmoins, il existe des limitations aux techniques d'AM qui doivent être dépassées pour rendre l'adoption de telles technologies soutenue. Pour le monde industriel, il importe de pouvoir réaliser des modèles plus fonctionnels et en plus grand volume. Sans cela, l'AM restera à son rôle de prototypage rapide. À court terme, des machines capables de générer des modèles d'une valeur supérieure, en étant plus performantes, devraient faire leur apparition (Basiliere, 2014). La figure 16 illustre l'émergence d'une nouvelle catégorie d'imprimantes tridimensionnelles aux performances avancées par rapport aux machines d'entrée de gamme et à des prix largement inférieurs à ceux d'équipements professionnels. À court et moyen terme, cette catégorie va attirer les entreprises désireuses de découvrir la technologie 3D sans investir des montants trop importants.

Émergence d'une nouvelle catégorie d'imprimantes 3D

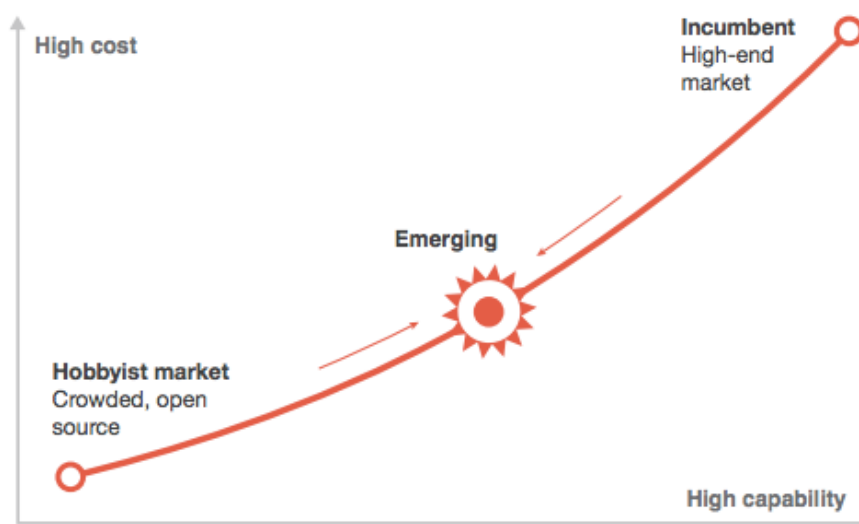


Figure 16 – D'après Boggeri, A., Pearce, J., Martinez, G., Liang, N., Duoss, E. & Furstoss, C. (2014). *The future of 3-D printing: Moving beyond prototyping to finished products. Technology forecast. PricewaterhouseCoopers : DL.*

Le nombre de secteurs utilisant l'AM va croître à moyen terme, de concert avec les améliorations techniques. Ceux utilisant déjà l'impression 3D vont étendre son utilisation au fur et à mesure que leur confiance dans la méthode se renforce. Des projets étonnants d'utilisation d'équipement d'AM vont encore faire sensation. Parmi les nombreux projets plus ou moins crédibles d'impression en trois dimensions, certains se démarquent par leur originalité et leurs instigateurs. C'est le cas avec le programme

visant à explorer les possibilités d'utilisation d'une machine 3D avec des denrées alimentaires mise au point par la Nasa et une entreprise texane. Pour le moment le projet est toujours en phase une et consiste à développer une machine capable de fonctionner avec des aliments. La phase deux, celle de test lors de vols spatiaux, n'est prévue que dans plusieurs années (Nasa, 2013). Dans le même secteur, mais avec des horizons plus longs, les ingénieurs de la Nasa et de l'ESA planchent sur l'impression de modules habitables sur d'autres planètes et la lune (ESA, 2013).

La recherche médicale n'est pas en reste en matière d'impression 3D. Certains analystes estiment qu'en 2015 un projet de création d'organes humains prêts pour la transplantation sera techniquement faisable. L'industrie automobile ne chôme pas non plus et des consultants de l'agence Barkawi imaginent que « l'ensemble de la production de Volkswagen devrait être assuré par des imprimantes 3D » en 2035 (Arte, 2014).

Services d'impression

Les services d'impression sont proposés par des sociétés équipées en machines 3D. Elles proposent d'imprimer des modèles contre rémunération. Faire appel à ces services est une bonne solution pour les entreprises qui ne disposent pas d'équipement suffisant – ou pas du tout – et qui n'ont pas nécessairement les compétences pour faire fonctionner les machines 3D. Cette industrie existe depuis une quinzaine d'années et se focalisait essentiellement sur le prototypage – l'AM était alors un moyen parmi d'autres pour réaliser les demandes des clients (Smartech markets. 2013). Les choses sont en train de changer progressivement, le nombre d'entreprises de services d'impression est en augmentation partout dans le monde. Wohlers Associates a référencé les gros et moyens acteurs sur le marché et en compte presque une centaine en 2015 (Wohlers Associates, 2015).

L'utilisation de l'impression tridimensionnelle par une entreprise est de plus en plus mise en avant, afin de profiter de l'image bénéfique de l'AM. Les particuliers sont devenus des clients potentiels pour ces sociétés qui leur proposent des impressions sur des machines high-end auxquelles ils n'auraient jamais pu avoir accès à titre privé. Dans certains cas, le service est offert via un site Internet et l'impression est faite par des sous-traitants. Des fabricants d'équipement se sont également lancés sur ce marché, notamment Stratasys, 3D Systems et Materialise ainsi que des grosses firmes

originellement à l'extérieure du monde de l'AM (Konica Minolta, 3D Scanneurs UK, etc.).

À moyen terme, les entreprises de services d'impression 3D vont réussir à s'adresser à un public de plus en plus large. Dans 5 ans, les revenus totaux de cette activité sont estimés à 4.469,8 millions de dollars. Une grande variation sera néanmoins palpable entre firmes en fonction de leurs utilisateurs finaux. Les services ciblant les particuliers réaliseront ainsi 481,9\$ millions, loin derrière le prototypage rapide ou l'automobile – respectivement 1.218,6\$ et 1.009,7 millions de dollars (Smartech markets. 2013). La figure 17 représente les revenus espérés des services d'impression 3D en 2020 par ciblage.

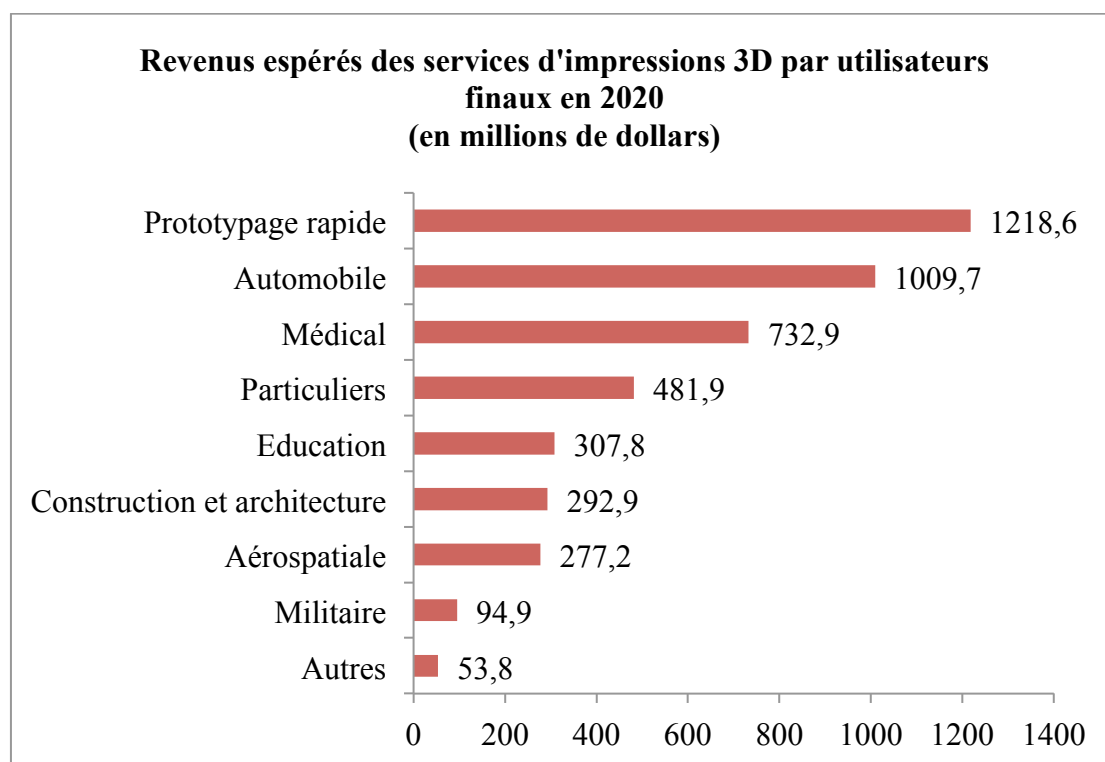


Figure 17 – Basée sur Smartech markets. (2013). *3D printing markets: hope, hype and strategies*. Charlottesville, VA.

Pour les particuliers

Le marché des particuliers est plus réduit que celui des industriels. Cependant, il enregistre un plus haut taux d'adoption et est la principale raison de la 'hype' qui entoure l'AM. C'est ainsi que le nombre des machines bas de gamme va dépasser de loin celui de l'équipement professionnel en 2017, mais sera dépassé en valeur (Moskowitz, M. 2014).

Pour le moment encore réduit, le marché se compose d' « early adopters » et d'optimistes technophiles. Beaucoup font partie du 'Maker Mouvement' et s'identifient bien avec une approche 'open source' de la technologie. Ce mouvement prend de l'ampleur au fil du temps et « *a le potentiel d'amener les experts comme les non-experts dans un monde où ils peuvent être des créateurs* » (Bajarin, T. 2014). Les équipements 3D ont vu leurs prix fondre, passant de 10.000\$ à une fourchette comprise entre 2000\$ et 5000\$– voire inférieur à 1000\$ pour les machines à construire soi-même, souvent issues du mouvement RepRap. Les prix déclinant, le marché low-end peut désormais s'offrir ce genre d'équipement. C'est l'arrivée de ces consommateurs qui aura un impact fort sur le monde dans les prochaines décennies. Les individus équipés en machines n'ont plus besoin des sources de capitaux (humain, financier, technologique) de grandes entreprises pour réaliser leurs créations. Ils entrent potentiellement en compétition avec les industries établies en pouvant rapidement bouleverser les règles développées dans un secteur.

« La taille du marché de l'impression 3-D est seulement limité par le rythme de l'innovation et les progrès de la science des matériaux »
(Moskowitz & Beard, 2014).

En 2020, le marché des particuliers est estimé à 1.287 millions de ménages – avec un prix moyen par imprimante gravitant autour de 330\$. En plus du nombre de machines d'AM en hausse, les scanners 3D profiteront aussi de la croissance, mais dans une moindre mesure (Smartech markets. 2013).

Software

La conception de logiciels adaptés aux pratiques de l'impression 3D est un marché qui va connaître des changements à court terme. Actuellement, beaucoup d'utilisateurs d'AM réalisent leurs projets en utilisant des programmes qui offrent des possibilités bien au-delà de l'impression 3D (réalisation de blue prints, de jeux vidéo, etc.). Ces logiciels ne sont pas toujours des plus adaptés pour cet usage et devraient être optimisés pour l'impression 3D. À l'inverse des services d'impression 3D, ce sont les particuliers qui représenteront la cible générant les plus gros revenus pour les éditeurs. Le marché est estimé à 317\$ millions en 2020 pour cette catégorie et à 1.540\$ millions tous secteurs confondus (Smartech markets. 2013).

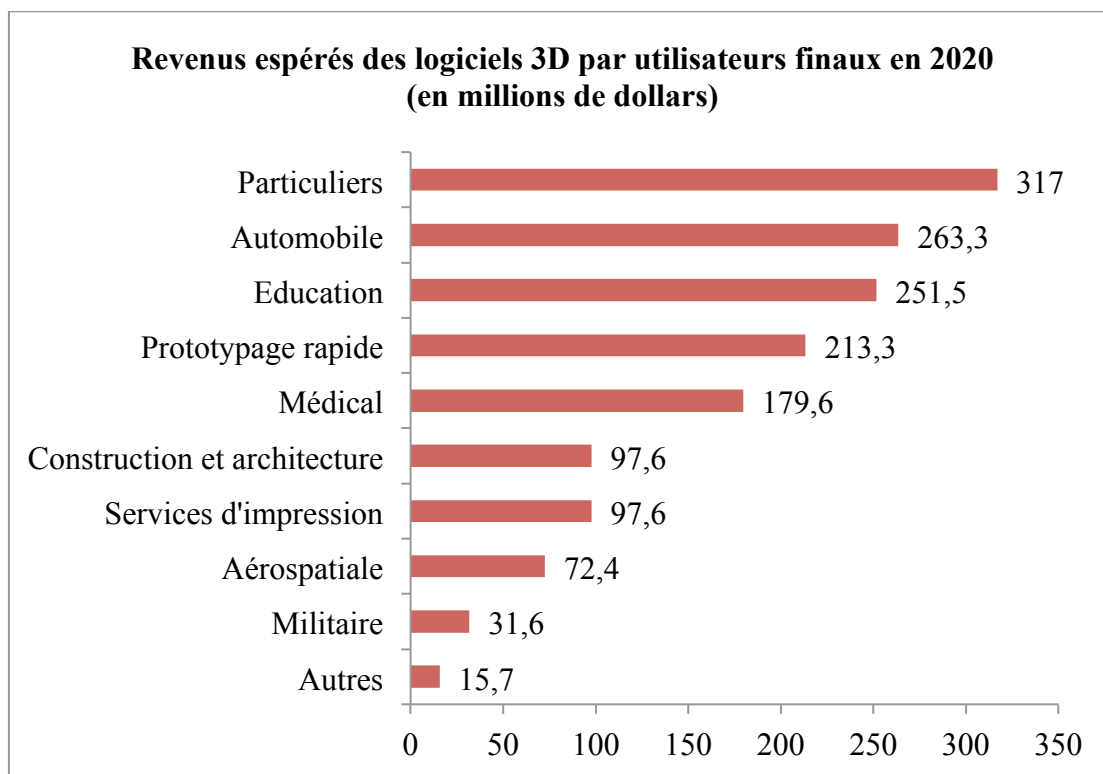


Figure 18 – Basée sur Smartech markets. (2013). *3D printing markets: hope, hype and strategies*. Charlottesville, VA.

CHAPITRE B : Progrès technologiques

Le développement des techniques et de l'utilisation des imprimantes 3D suscite un engouement certain, mais il importe de prendre un peu de recul. L'AM souffre encore de défauts évidents. Parmi ceux-ci, il faut citer les dilemmes techniques rencontrés en termes de coût, de constance du processus, de vitesse, de variété de matériaux et de confiance de la part des consommateurs (Cotteleer & Openshaw, 2014).

Les technologies 3D ont encore besoin de recherche et développement afin de minimiser, voire d'éliminer totalement, des aspects techniques qui freinent son adoption actuellement. Ces limites sont autant de défis à relever afin de rendre plus accessible l'impression 3D. En fonction des technologies d'AM utilisées, des différences dans les limitations peuvent être remarquées. Il existe toutefois des similitudes communes à toutes. Elles sont développées ci-dessous.

Vitesse d'impression

La littérature sur le sujet est sans appel, s'il ne fallait citer que deux obstacles à l'adoption de techniques d'AM, c'est sans aucun doute la vitesse qui est citée en premier. Le premier challenge est de faire face à la lenteur des processus. Cela est particulièrement vrai lors de l'impression d'objets de grande taille ou à géométrie complexe. D'après Rob Winker (2014), les processus d'AM plus rapides bénéficient d'un avantage par rapport à d'autres. Les machines dites de bureau, typiquement des FDM/FFF et SL, fonctionnent à une vitesse comprise généralement entre 50 et 150 mm/s (Milkert, 2015). Cela semble vélocité, mais la hauteur de la matière déposée est mince, ce qui se traduit par une vitesse de construction faible (cela dépend aussi de la densité de l'objet à imprimer). De plus, les matières utilisées – surtout les thermoplastiques – ont besoin d'un temps de refroidissement afin de se solidifier et de pouvoir recevoir la couche supérieure. Il existe donc une limite physique à la vitesse maximale que peut atteindre une imprimante 3D. D'autres techniques d'impression 3D, comme le LOM par exemple, sont aussi restreintes dans leurs vitesses par des limitations pratiques (augmentation des frottements et donc de la température, etc.). Il est certain qu'il existe encore une marge d'amélioration possible, mais pour les technologies existantes, les gains de rapidité seront surtout d'origine logicielle. En ajustant le parcours des têtes d'impression (extruder, laser, etc.) grâce à des algorithmes plus sophistiqués, il est possible d'optimiser le temps de refroidissement

nécessaire des matériaux. Une autre piste intéressante afin de réduire le temps de fabrication consiste à ajouter plus de têtes d'impression. La distance moyenne à parcourir par tête d'impression pour imprimer un objet est diminuée, ce qui permet d'accélérer la superposition de couches.

Comparaison des vitesses d'impression en ligne droite entre machines FFF grand public

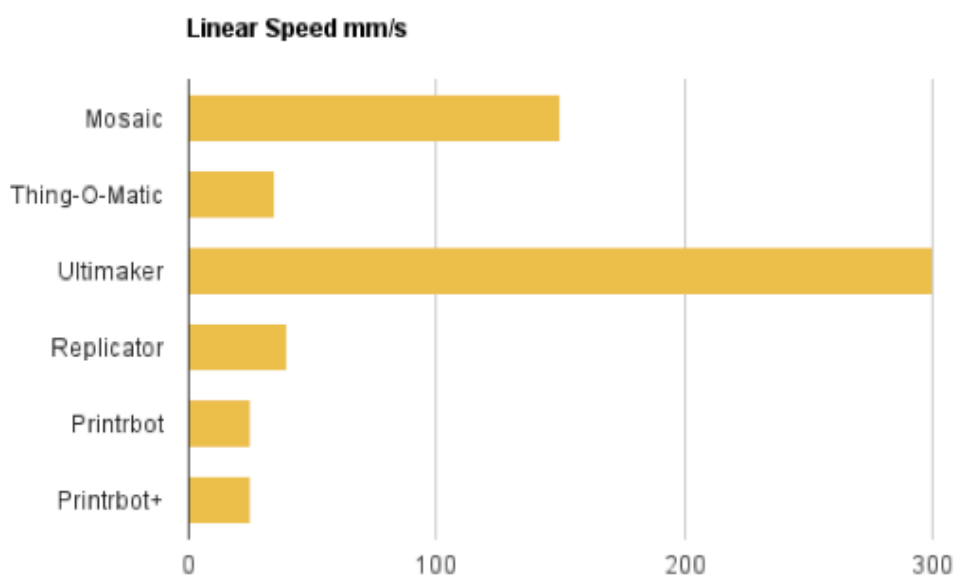


Figure 19 – D'après Chilson, L. (2012). *Comparing entry level 3d printers*. En ligne <http://www.protoparadigm.com/news-updates/comparing-entry-level-3d-printers/>, consulté le 10 juillet 2015.

La figure 19 illustre bien les différences qui existent entre des machines utilisant la même technologie, mais de constructeurs différents.

Outre les sept familles de techniques 3D et leurs technologies abordées dans ce mémoire, de nouveaux venus ont fait leur apparition depuis le début de la rédaction de ce travail. Si elles ne sont pas présentées dans les sections précédentes c'est parce qu'elles n'ont été qu'annoncées et ne sont pas encore disponibles ou qu'elles ne semblent pas crédibles face aux solutions existantes –la technologie CLIP en est un bon exemple. Il existe toutefois des technologies nouvelles, qui ont été créées dès le début avec le challenge de vitesse à l'esprit. C'est le cas de la technologie CLIP (Continuous Liquid Interface Production), développée par Carbon3D, pas encore commercialisée, ses concepteurs assurent qu'elle est jusqu'à cent fois plus rapide que d'autres moyens d'impression et que sa production est plus résistante et à un coût inférieur. Dans leur

article paru dans Science, Tumbleston et al. (2015) semblent garantir l'avenir de cette technique.

Les imprimantes Gizmo 3D ont aussi fait l'actualité de la presse spécialisée de la 3D en assurant pouvoir accélérer l'impression avec un dérivé de la technique de DLP (Direct Light Processing). À l'inverse du CLIP, il n'y a pas eu de publication indépendante à son sujet. Idem pour la société Create it REAL qui propose une carte mère à ajouter à une machine existante afin de booster sa rapidité d'impression. La vitesse maximale théorique serait repoussée à 1.800mm/sec. Cela pourrait signifier qu'un objet qui prend quatre heures pour être fabriqué ne demanderait plus que 24 minutes. Ces technologies semblent prometteuses et sont à garder à l'œil.

Coûts

Des coûts élevés sont le deuxième obstacle relevé par la plupart des publications. Ces coûts induits par l'AM impliquent qu'il est souvent plus coûteux de produire un objet avec une technologie 3D que via des méthodes de fabrication classique. C'est ce qui fait dire à Laseter & Hutchison-Krupat (2014) « *qu'il est trompeur d'envisager un avenir à court terme dans lequel l'imprimante 3D à la maison pourra faire une fourchette ou une pièce de jeux d'échecs* ».

Lors d'un sondage auprès de 300 sociétés, Gartner explique que 60% des répondants ont postposé des investissements dans l'AM à cause des coûts d'entrée trop élevés. L'origine de ces dépenses est à trouver dans six postes relatifs à l'impression 3D (Basiliere & Shah, 2015) :

- L'investissement pour les machines 3D est encore important. En fonction des usages, les dépenses seront plus ou moins importantes. Pour des impressions simples (du prototypage de forme par exemple), pour lesquelles une machine plus basique est suffisante, il faut compter au minimum quelques milliers d'euros. Des machines plus fiables, aussi utilisées par des particuliers enthousiastes et fortunés, tournent autour des 2.000€ euros. Si l'usage est plus précis, comme pour la fabrication de pièces de métal fonctionnelles, il faut compter plusieurs dizaines de milliers d'euros.

La tendance à la baisse des prix de l'équipement 3D est déjà marquée pour les machines grand public. Cela va encore se renforcer à court terme, et les

imprimantes de moins de 1.000 dollars vont gagner en fiabilité (Moreno, 2014).

- Les matériaux pour l'impression 3D sont encore très coûteux. Le marché n'est pas encore pleinement développé et les volumes sont encore relativement faibles. Les consommables pour les particuliers coûtent en moyenne 45\$ pour un kilo. Il s'agit de thermoplastiques (ABS, PLA, etc.). Ils sont vendus sous la forme de bobines de filaments ou de granulés, parfois sous une forme propriétaire qui limite l'utilisation à une seule marque d'imprimante. Les matériaux à usages plus industriels sont à un prix supérieur. Les poudres sont plus chères, entre 50 et 100€ le kilo. La résine liquide coûte entre 200 et 600€ le litre, l'acier jusqu'à 200€/kg, le titane plus du double, etc (Moussion, sd).
À l'avenir, en parallèle avec des volumes en hausse, les prix des consommables vont diminuer. Ce poste restera toutefois important, particulièrement pour les particuliers, parce que certains fabricants adopteront des formats propriétaires pour leurs consommables (une stratégie suivie par les fabricants d'imprimantes 2D).
- Les licences des logiciels nécessaires à l'impression 3D représentent aussi un coût important. Il est actuellement nécessaire d'utiliser au moins trois programmes s'il on veut contrôler toute la chaîne de production 3D : un logiciel CAD pour la création des objets en version numérique, un logiciel pour vérifier la cohérence du modèle et garantir son imprimabilité et un logiciel pour le 'slicing' (cfr Chapitre A, Section 1). Un effort est réalisé par les programmeurs pour fusionner les deux derniers types de logiciels, mais ce n'est pas encore une généralité. Le nombre grandissant de logiciels 'open source' remplissant au moins une des fonctions citées ci-dessus est en augmentation. Leur qualité aussi, poussant les développeurs des solutions payantes à innover.
- La main d'œuvre nécessaire pour faire fonctionner l'équipement 3D est une dépense importante. Cet aspect sera traité dans le chapitre C de cette section.

- L'équipement 3D nécessite des installations adéquates. Il est nécessaire de refroidir certaines machines, d'assurer des alimentations électriques spécifiques, des aérations, etc. De plus, les opérations de post-traitement ont également besoin d'espace. Tous ces aspects pratiques représentent des coûts fixes difficiles à réduire, mais facilement prévisibles.
- Finalement, l'intégration des processus induits par l'impression 3D au sein d'une activité est une dépense à prendre en considération avant d'adopter l'AM.

Une réduction de coût d'un des postes cités ci-dessus est une opportunité pour le marché 3D. À voir la diversité des origines de ces postes, des changements viendront de plusieurs côtés : les fabricants, les programmeurs, des acteurs actifs dans les consommables uniquement, etc.

Limites des matériaux

La gamme de matériaux imprimables s'allonge de jour en jour, mais elle n'est pas encore suffisante pour concurrencer sérieusement les méthodes de fabrication classiques. De plus, pour les industriels, leurs prix sont parfois rédhitoires (cfr. supra). Pour les particuliers, imprimer autre chose que du plastique est encore largement inaccessible. Des efforts sont déjà consentis afin de développer des plastiques avec des propriétés ajoutées (comme la conductivité électrique ou du magnétisme par exemple). À plus long terme, les métaux et autres matériaux (céramique, etc.) seront à la portée du grand public (Earls & Baya, 2014).

Taille des objets et résolution

La limite des tailles qu'il est possible d'imprimer avec des méthodes d'AM est perçue par certains industriels – et quelques rares particuliers – comme problématique. Le développement de machines aux volumes d'impression plus importants est une opportunité pour les fabricants. L'augmentation des tailles se fait aussi déjà légèrement sentir pour les particuliers bien que les industriels soient mieux servis. La société Materialise offre, par exemple, des services d'impression sur ses machines Mammoth qui ont un plateau de deux mètres sur un, avec une hauteur de un mètre (Materialise, 2014).

À l'inverse de la recherche de volumes d'impression toujours plus grands, il est aussi nécessaire d'affiner la résolution des machines. Celle-ci peut être améliorée en diminuant l'épaisseur minimum des couches ce qui a pour effet de lisser le modèle. La plupart des imprimantes 3D low-end sont capables d'extruder en 0,2 ou 0,3mm, mais d'autres techniques vont jusqu'à quelques microns seulement.

Multi-matière et multicolore

Il est actuellement possible de produire un modèle avec plusieurs matériaux, mais les possibilités sont limitées. Combiner plusieurs matériaux dans un même objet est encore une difficulté de taille pour l'impression 3D. La possibilité de produire, par exemple, une chaussure de sport ne sera pas encore possible avant une dizaine d'années. Bien que Nike ou New Balance planchent sur le sujet, ces fabricants ne produisent encore que des parties de leurs produits (des crampons et des semelles respectivement). Il faudra être encore patient avant de pouvoir créer des objets aux composants multiples et multi-matière (Allard, sd).

À moins longue échéance, l'impression 3D multicolore est annoncée. Jusqu'ici, la possibilité d'imprimer des objets en couleur était une préoccupation secondaire, la plupart des applications ne nécessitant pas l'usage de la couleur. Cependant, cet aspect va devenir de plus en plus important sur le marché. Des fabricants, même relativement nouveaux dans l'aventure 3D (comme HP par exemple), affirment être en mesure d'offrir à moyen terme des machines pour particuliers et professionnels disposants d'une large palette de couleur. En combinant ces deux avancées, le multi-matière et les couleurs seront aussi capables de se mélanger, promettant des modèles colorés et aux propriétés variantes grâce aux variations de matériaux.

Améliorations futures des aspects liés aux matériaux utilisés

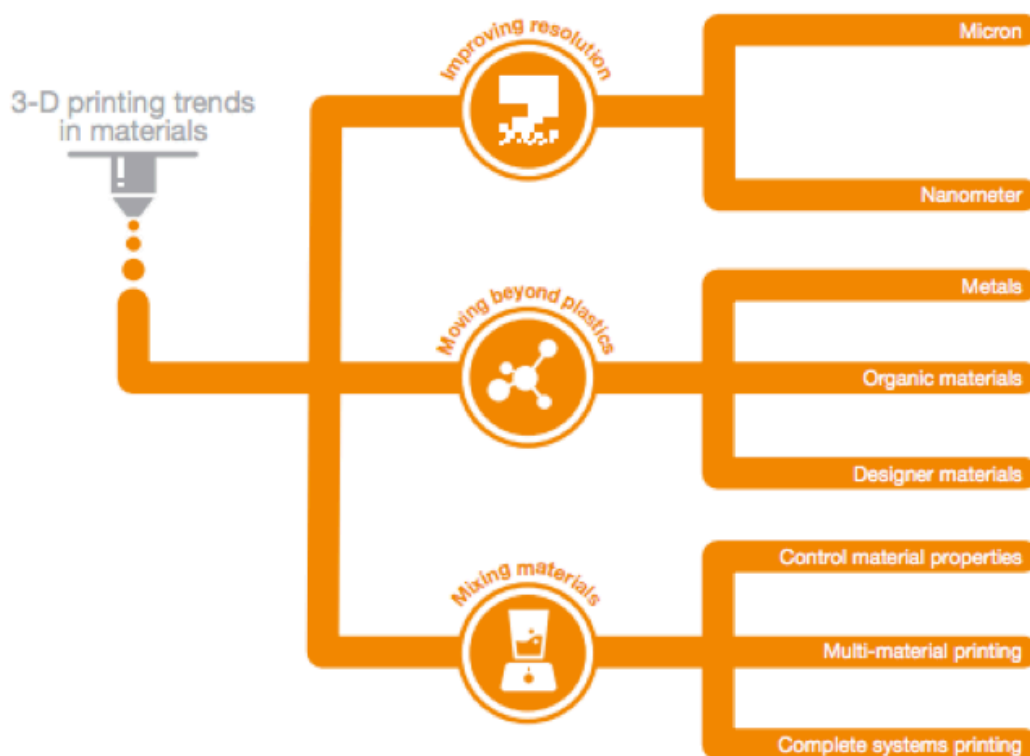


Figure 20 – D’après Wood, L. & Baya, V. (2014). *The role materials play in powering the 3-D printing revolution*. Technology Forecast: The future of 3-D printing. Vol. 2. p2.

Expérience d’impression 3D avec filaments multiples

Lors de mon stage, j’ai eu beaucoup d’occasions, pendant des démonstrations clients, d’imprimer avec deux têtes d’impressions sur une imprimante FFF. Cela permet de travailler avec deux couleurs ou deux matériaux. La tâche était loin d’être évidente, car souvent, les deux filaments se mélangeaient et ne donnaient pas un rendu très propre. Les améliorations futures pour les impressions multicolores et/ou multi-matières ne seront pas dues exclusivement au hardware. Les logiciels de ‘slicing’ ont aussi un rôle important à jouer. Materialise – un acteur belge de l’impression 3D – travaille sur un algorithme qui améliorerait ce point. Les académiques se penchent aussi sur cet aspect. Ainsi, Hergel & Lefebvre (2014) ont développé des techniques capables de diminuer ces défauts. De plus, des algorithmes spécifiques à d’autres techniques d’impressions 3D sont à l’étude. America Makes a ainsi créé un concours pour la création d’algorithmes ‘open source’ permettant d’obtenir des pièces de métal de meilleure qualité avec du SLM (Kurzweilai, 2015).

Software et intégration

Créer des modèles numériques prêts à l'impression est une tâche difficile. Les logiciels utilisés sont bien souvent des programmes employés aussi en architecture ou en conception d'animations 3D et ne sont donc pas pleinement optimisés pour l'AM. L'offre de logiciels spécifiquement adaptés à l'impression 3D va s'étendre à court terme, proposant une gamme complète d'outils pour gérer la production de A à Z.

« Les softwares offrent un potentiel énorme pour considérablement améliorer la fonctionnalité et améliorer les économie »

(Earls & Baya, 2014).

Les logiciels détiennent en partie les clefs d'une amélioration des processus d'impression 3D. S'ils sont correctement intégrés à l'écosystème en place, ils permettront d'innover (Earls & Baya, 2014, p3). En associant des technologies existantes, il est déjà possible de dégager de la valeur pour les utilisateurs. C'est le cas, par exemple, d'une machine contrôlable par smartphone, capable d'aller chercher un modèle sur le net en wifi sans passer par un ordinateur ou capable d'imprimer de façon autonome – sans être connectée à un ordinateur.

En 2016, il est estimé que 10% des machines de moins de 1000\$ seront « plug-and-print » (Perkins et al. 2015, p18). Ce pourcentage est faible et risque de dissuader les moins technophiles d'adopter l'AM à court terme. Néanmoins, pour des machines de la gamme supérieure, les constructeurs attachent une attention de plus en plus grande sur ce point, et le confort d'utilisation en général.

CHAPITRE C : Impacts socio-économiques

L'impression tridimensionnelle, certains l'annoncent comme une troisième révolution industrielle, d'autres – plus sceptiques – n'y voient qu'un gadget pour hobbyistes. La vérité est, comme souvent, entre ces deux extrêmes. Dès 2011, le magazine *The Economist* proclamait l'arrivée de l'AM comme une technologie dont les conséquences seraient impossibles à imaginer à long terme. Selon ce même article, « l'impression 3D apportera un changement technologique si profond que l'économie industrielle sera 'réinitialisée'. C'est une "troisième révolution industrielle" » (*The Economist*, 2011). C'est aussi l'avis que partage Clément Moreau, cofondateur de *Sculpteo*, une entreprise française de service d'impression 3D (Laubacher, 2012) ou encore le président Obama pour qui l'impression 3D « a le potentiel de révolutionner la façon dont nous concevons presque tout » (Barack, 2013). Selon la firme *Gartner* l'impression 3D est 'hype' (voir Chapitre A, Section 2) et ses applications futures sont surévaluées, mais l'AM n'en reste pas moins une technologie très intéressante. Il est pourtant certain que l'impression 3D va amener des bouleversements dans les habitudes de consommations, de production et dans l'organisation sociale.

Impacts sur l'emploi

Les nouvelles technologies ont de tout temps suscité un débat quant à ses effets sur l'emploi. L'impression 3D n'échappe pas à la règle et est similaire à ce qu'il était possible de voir dans les années 70', avec l'avènement des ordinateurs. Il est certain que, comme initié par des technologies précédentes, la tendance à l'automatisation dans l'industrie va se poursuivre (Krassenstein, 2014). Les travailleurs peu qualifiés sont peu à peu remplacés par des machines et des logiciels qui peuvent fournir la même production – si pas de meilleure qualité – à un prix inférieur (King, 2013). Les capacités d'AM, par nature très modulables, pouvant être intégrées à des secteurs différents, il faut considérer un large spectre de jobs potentiellement menacés par cette technologie. Il ne s'agit pas que de travailleurs actifs dans l'automobile ou l'aéronautique, par exemple, mais aussi dans l'industrie textile ou dans la construction (Frey, 2012).

L'économie de la distribution va aussi connaître des changements. En effet, les utilisateurs privés d'imprimantes 3D pourront répondre en partie à leur consommation de façon autonome. Ils n'auront plus besoin de se rendre dans des magasins pour l'achat de

certains biens. D'ici une décennie, les effets commenceront à se faire sentir. Les 'retailers' devront prendre en compte ce changement comportemental qui affectera les emplois du secteur et la rentabilité des enseignes. Des points de vente hybrides magasins/services d'impression verront le jour à moyen terme avec du personnel qualifié pour aider les consommateurs à choisir et personnaliser leurs achats (Bengtson, 2014).

« 'Au plus complexe est le produit que vous voulez créer, au plus de travail et d'efforts sont nécessaires – ce qui se traduit par des coûts plus élevés'. Le processus d'impression 3D retourne cette convention»
(Wadhwa, 2013)

Des effets auront également lieu dans le domaine de la livraison et l'expédition. Les transporteurs souffriront, à long terme, d'une concurrence sur les biens manufacturés. Puisqu'il sera possible de fabriquer un bien au plus près du consommateur – à domicile ou dans une zone géographique proche – le coût de transport sera perçu comme une part non significative du prix du produit. Une focalisation sur le transport des matières premières par les transporteurs sera nécessaire.

Les sociétés de livraison commencent aussi à comprendre les dangers que l'AM fait peser sur leur secteur. Certains ont déjà pris les devants et expérimentent de nouveaux services tirant parti de l'impression 3D. C'est le cas, par exemple, de la Royal Mail qui offre un service d'impression couplée à la livraison (Gibbs, 2014) ou de La Poste française (Le Monde, 2013). Des initiatives encore plus innovantes voient le jour. C'est le cas du projet de Amazon qui, pour diminuer le temps de préparation des livraisons, envisage d'imprimer à bord de ses camions. Attention toutefois, la firme de Seattle a fait une demande de brevet, mais ne l'a pas encore exploité (Snyder, 2015).

L'impression 3D laisse croire à une réallocation de la production dans les pays qui ont connu une délocalisation profonde. La possibilité sur place rend caduque l'idée de produire loin des endroits de consommation et permet une plus grande réactivité face aux demandes locales. Cette démocratisation de l'AM va de pair avec une simplification de la technique.

Création d'emploi

S'il y a des pertes d'emploi suite à l'utilisation d'équipement 3D, tout n'est pas noir pour autant. Il est évident que de nouveaux métiers vont aussi voir le jour. Ce qui est intéressant à déterminer c'est si la différence entre les jobs dépassés et ceux créés sera positive. De plus, le changement de paradigme tant annoncé ne se fera pas en un jour, mais de façon progressive durant les 20 prochaines années. Une transition va s'opérer entre des jobs peu qualifiés et des emplois nécessitant une connaissance poussée, très spécialisée.

Du côté de la création d'emploi, il est actuellement possible de voir la demande grandissante. Les profils recherchés sont variés. Cela va de la maintenance et de la réparation de machines 3D à leur conception, en passant par les développeurs de logiciels, les designers et 'product managers'. À ces emplois assez généraux il faut aussi envisager la création de postes spécifiques à un secteur dans lequel l'AM est, ou sera, utilisé. C'est pourquoi les individus qui ont les capacités à assimiler de nouvelles informations auront un avantage réel (King, 2013).

« Alors que l'impression 3D devient plus largement utilisé, il semble qu'une ambiguïté dans la définition des rôles du travail va naturellement prendre racine, brouillant les frontières entre des domaines tels que la fabrication, le développement de produits et les services de détail »

(King, 2013).

Selon Freelancer.com, un site d'outsourcing, les possibilités d'emplois ayant trait aux rendus 3D ont connu une augmentation de 17,3% au deuxième trimestre 2013. À la même période, la tendance à la hausse a aussi touché la modélisation 3D et l'animation, avec respectivement 12,5% et 11,7% d'accroissement. Tous les métiers relatifs à l'AM devraient connaître une demande forte (Parker et al., 2013).

Afin de répondre à la demande grandissante de travailleurs qualifiés en AM, des initiatives, privées ou publiques, ont vu le jour. Beaucoup de pays ont mis en place des centres de recherches et de formations. C'est, par exemple, le cas de America Makes, un organisme créé en 2012 en Ohio afin d'étudier les impacts de l'impression 3D sur l'économie américaine. Il travaille en collaboration avec des universités et des industriels

afin de faciliter le développement et la flexibilité des solutions d'AM (America Makes, sd). Concrètement, l'organisation met de l'équipement à disposition des chercheurs et de personnes désirant se former, elle organise des concours pour booster l'innovation, etc. Gene Sperling, un conseiller économique à la Maison-Blanche qui a conçu l'initiative, explique qu'un effet de propagation est recherché. Loin de ne se focaliser que sur la formation de travailleurs hautement qualifiés, l'AM pourrait – selon lui – avoir un effet bénéfique sur l'emploi en général (Edwards & Lange, 2014). Le Fraunhofer Institute, en Allemagne, a servi de modèle à America Makes. Sa cousine européenne, qui touche à plus de domaines que l'impression 3D seulement, a réussi à développer un partenariat solide avec universitaires et industrie.

Des initiatives privées existent aussi, notamment avec *The 3D Printing Association* qui possède des hubs aux États-Unis et en Europe. Les objectifs sont les mêmes que pour les organismes publics, une approche business en plus, et il est possible de se faire membre en payant un montant annuel (The 3D Printing Association, sd).

Habitudes de consommation

Il est évident que l'impression tridimensionnelle aura des impacts sur l'économie et l'emploi (cfr. supra.) mais l'AM va aussi changer les habitudes de consommation des particuliers. Celles-ci évolueront de concert avec les avancées techniques et transformeront profondément le quotidien. À moyen terme, par exemple, il sera possible d'imprimer des pièces de rechange relativement simple pour des appareils électroménagers (un bac à couverts pour lave-vaisselle par exemple). Le modèle numérique sera téléchargeable sur le site du fabricant ou envoyé au particulier. Il est possible d'imaginer d'autres scénarios ; un individu casse une assiette, trouve le modèle digital en ligne et l'imprime s'il est équipé d'une machine prenant en charge la céramique – sinon il peut aller dans un FabLab ou copy shop proche.

Tous les particuliers n'auront pas les connaissances techniques et le matériel nécessaire pour remplir une telle prédication. Cela n'empêche que l'impression 3D sera un élément de leur vie. L'impression 3D permet de passer d'un marché de masse à une customisation extrême. Le sur-mesure sera la norme. Un produit pourrait être choisi, après modifications logicielles il sera imprimé pour coller au plus près des attentes du client. Une bonne illustration de ce propos serait la décision d'un consommateur d'acheter une paire de chaussures. Après quelques retouches sur un modèle numérique de

celles-ci, elles sont imprimées. Les modifications ont permis de rendre les chaussures parfaitement adaptées au pied du consommateur et de changer les couleurs pour qu'elles soient à son goût. C'est déjà presque ce que réalise Jia Yu Dai, une passionnée de design. Seule la faible échelle de son projet marque la différence (Notteau, 2015).

« L'impression 3D va tout bouleverser en l'espace de dix ans: les processus de production, l'éducation et les habitudes de consommation »

(Reichental, 2013).

Les espaces de vente seront modifiés suite à l'arrivée des technologies 3D et leur usage par les particuliers. Les copy shop – ou printing shop – ne seront pas des endroits où les consommateurs seront tous passifs. Des individus y réaliseront leurs projets pour qu'ils collent au mieux à leur attente. Ils occuperont ces espaces parce que leur équipement à domicile ne leur permet pas de finir leur réalisation (parce que leur modèle est trop complexe, utilise des matériaux non supportés, etc.). Les espaces dédiés au savoir comme les librairies ou les bibliothèques pourraient aussi subir des transformations. Ils seront utilisés de plus en plus comme un endroit dédié à la collaboration et à la rencontre de pairs (Birtchnell et al., 2013).

CHAPITRE D : Aspect légal

Les aspects légaux relatifs à l'impression 3D ne sont pas au centre de notre étude. Il importe toutefois d'évoquer le sujet, car il influence et influencera le développement de la technologie et de son utilisation. Gartner estime à \$100 milliards les dommages qu'aura subi en 2018 le marché de l'AM par manque de respect des propriétés intellectuelles (Rivera, 2013). L'impression 3D est une technologie qui n'échappe pas aux questions de propriété intellectuelle, les nouvelles technologies ont souvent un effet disruptif sur les systèmes de protection intellectuelle mises en place (Finocchiar, 2013, p480). Cette dernière porte sur deux aspects : les techniques propres aux différentes technologies d'AM et, depuis son adoption grand public, aux produits fabriqués.

Pour les fabricants

Le premier volet connaît un profond bouleversement. Les pionniers sur le marché de l'impression tridimensionnelle étaient, jusqu'à récemment, relativement peu regardants sur les éventuels non-respects de leurs propriétés intellectuelles. Détenant des brevets indispensables pour la création de machines, surtout pour la technologie FFF, ils laissaient faire afin d'augmenter la taille du secteur et accroître la connaissance générale du public à propos de l'AM. Cette stratégie a vécu et les ténors du secteur (3D Systems et Stratasys en tête) opèrent un virage à 180 degrés de leur stratégie. Bien que beaucoup de brevets soient déjà tombés dans le domaine public, il existe encore des protections clefs et ces sociétés comptent bien les utiliser à leur avantage pour réduire la concurrence (Hornick & Roland, 2013). Stratasys montrait la nouvelle voie suivie en 2012 en attaquant Formlabs et Kickstarter devant la District Court de Caroline du Sud pour violation de propriété intellectuelle du brevet U.S. Patent No. 5,597,520 concernant le « Simultaneous Multiple Layer Curing in Stereolithography ». Ce sera le début d'une série de procédures judiciaires (Chirgwin, 2012).

Pour les particuliers

Le deuxième aspect relatif à la propriété intellectuelle porte sur les objets qui peuvent être réalisés à domicile par des particuliers sans assistance extérieure nécessaire (Depoorter, 2014). L'adoption grandissante d'imprimantes 3D par un public général amène les industriels et les pouvoirs publics à se pencher sérieusement sur la question –

ce n'était curieusement pas le cas avant 2010. En effet, il n'existe actuellement pas de solution afin de limiter les copies de produits pourtant protégés ou interdits – notamment les armes imprimées qui inquiètent beaucoup les autorités (Bradshaw & al., 2010). A plus longue échéance, les particuliers pourraient aussi vouloir se prémunir contre des réutilisations abusives de modèles créés par eux et partagés sur des plateformes en ligne (Doherty, 2012).

Il existe quatre types de propriétés intellectuelles qui peuvent potentiellement poser problème lors de l'utilisation d'une imprimante 3D. L'objectif de ce travail n'est pas d'analyser les aspects juridiques qu'implique l'AM mais il est intéressant de comprendre les bases des protections légales existantes en Belgique.

1. La protection du design qui couvre l'apparence de tout ou une partie des produits, en partie à cause de leurs lignes, couleurs, textures et matériaux. L'utilisation privée et à usage non commercial échappe à cette protection. Un usage purement domestique de son imprimante 3D n'est donc pas tenu de respecter la directive (Directive 98/71/EC, 1998).
2. Le copyright ou droit d'auteur (selon la conception de droit commun ou de droit civil – en partie harmonisée depuis la convention de Berne) est un droit qui est attribué lors de la création d'une œuvre originale à son auteur. La reproduction de l'œuvre n'est possible qu'avec l'accord de ce dernier. Le droit d'auteur interdit la copie exacte des œuvres ce qui est actuellement encore fortement éloigné des possibilités de l'impression tridimensionnelle pour particuliers (FFF). De plus, la copie privée permet une utilisation personnelle sans crainte de poursuites.
3. Les brevets, pour un territoire donné, donnent un droit d'interdiction d'exploitation par un tiers de l'invention ou du procédé breveté. Ils courent généralement sur une période de 20 ans. Cet aspect est plus sensible. Un utilisateur générant souvent un modèle à partir d'un produit existant – par ingénierie inversée – plutôt qu'en copiant l'original.
4. Le droit de marque ou trade-mark permet de reconnaître l'origine d'un produit et confère à son producteur un monopole d'exploitation durant toute la durée de vie de la marque. De ce cas-ci aussi, il existe une certaine jurisprudence face aux utilisations privées. (Pierce & Schwarz, 2015).

Légalement, il existe un certain flou quant aux limites imposées aux particuliers et leur usage de l'impression 3D. Pour le moment, aucun cas d'infraction à la propriété intellectuelle n'a été recensé en Belgique.

Il n'empêche que certains acteurs poussent les législateurs des pays équipés de parcs de machines 3D à l'adoption de mesures de protection. Ces techniques peuvent être légales ou techniques, à l'image de ce qui avait été réalisé pour l'industrie de la musique à l'ère de sa numérisation. Certains acteurs envisagent l'utilisation de DRM (Digital Right Management) comme solution. D'autres arguent que, comme dans le cas de la musique, son efficacité sera limitée et les individus avec des connaissances plus avancées n'auront aucun problème à les contourner. Une solution technique avancée comme potentiellement efficace concerne l'implémentation massive de l'usage de stéganographie. Chun-Shien (2004) définit cette technique comme « *la science et l'art de la communication secrète* ». Le principe consiste à insérer un message caché dans une communication ou un objet. La technique fut utilisée par les fabricants de copieurs qui – voulant rassurer les gouvernements – intégrèrent dans leurs logiciels une reconnaissance des billets de banque et un blocage automatique en cas de tentative de copie (Naramore, 2012). Introduire ce système est tentant pour les fabricants attentifs à ne pas se mettre à dos les politiques. Les objets détectés par les machines d'AM pourraient détecter des œuvres d'arts, des designs protégés, des armes, etc (Chun-Shien, 2004).

CHAPITRE E : Autres développements futurs

L'impression 3D, jusque-là confinée à un marché de niche, devient de plus en plus présente et étend ses marchés. Il existe toutefois des applications spécifiques qui n'intéressent – et n'intéresseront – qu'un nombre réduit d'individus ou d'industriels. Les machines ou services associés à ces marchés présentent l'avantage de se démarquer de la concurrence et offrent une plus haute valeur ajoutée.

Recyclage du plastique

Ironie du sort, l'impression 3D, souvent présentée comme une méthode de production plus propre que les techniques de fabrication classiques car produisant moins de déchets, n'est pas toujours très respectueuse de l'environnement. Ceci est particulièrement vrai pour les machines FFF et FDM qui utilisent des thermoplastiques encore trop malheureusement non recyclables. Largement représentées par le RepRap project, cet équipement low-cost et open source pourrait bénéficier d'un coût d'utilisation réduit s'il utilisait des déchets de polymères comme matière première.

Techniquement la prouesse est réalisable, comme le montre le travail de Baechler et al. (2013). Des systèmes existent pour transformer les rebuts de plastique en filaments utilisables pour les machines (un exemple de ce type de produit serait le Filabot). Il devient plus facile de recycler, car il est possible de le faire à proximité de l'équipement d'AM et le produit fini est directement réutilisable. Il n'y a plus besoin de faire appel à des services de récupération de déchets 3D. Ce genre d'équipement va se développer à moyen terme.

« Ce système nous permet d'imaginer un avenir où nous n'imprimons pas seulement des pièces de réparation ou des pièces de rechange pour nos biens au lieu de les jeter, et en utilisant des déchets plastiques dans le processus »

(Treacy, 2013).

L'impression 3D va avoir un impact croissant sur la demande de plastique dans les années à venir. C'est pourquoi il est nécessaire de penser à des solutions de réduction et de recyclage des déchets. 125.000 tonnes de plastiques seront allouées à l'AM en 2020. Cela représente approximativement 1,4 million de barils de pétrole et générera plus de

400.000 tonnes d'émissions de carbone par an (Sevenson, 2014). Afin d'optimiser le recyclage, il est nécessaire de connaître la composition des plastiques. Actuellement, la majorité des thermoplastiques 3D sont regroupés sous la catégorie sept des polymères aux Etats-Unis, une classification pour aider au recyclage. Pourtant ils peuvent être de nature différente (ABS, PLA, etc.). Joshua Pearce et son équipe ont mis au point un système basé sur les codes utilisés en Chine – plus complets – en attendant une adaptation des standards nécessaires pour simplifier les possibilités de recyclage (Pearce et al., 2015).

Certifications

L'impression 3D est une mosaïque de technologies différentes – parfois très éloignées techniquement l'une de l'autre. Cette variété est source de difficultés quant aux attentes vis-à-vis d'une méthode plutôt qu'une autre. Afin de rendre l'adoption de l'AM plus aisée et plus transparente, il est nécessaire de développer un cadre de soutien et des normes industrielles. Il est nécessaire que les standards soient une réponse aux besoins des marchés. Une terminologie et des principes généraux bien définis constituent la première étape vers des normes communes (Tranchard & Rojas, 2015).

Actuellement plusieurs organismes travaillent à la publication de standards spécifiques à l'industrie AM. C'est le cas d'organes reconnus : l'International Organization for Standardization (ISO), l'American Society of Mechanical Engineers (ASME), l'American Society for Testing and Materials (ASTM), l'UL Material Testing, etc.

Plusieurs aspects sont évalués, comme la sécurité (inflammabilité, toxicité, distribution de la taille des particules, la qualité des polymères, du métal et du composite), la compatibilité de l'équipement, le test de protocoles spécifiques, etc. À court terme, la liste de standards relatifs à l'impression 3D devrait être plus fournie.

Impression 4D

L'impression en 4D est jusqu'à présent toujours réservée aux laboratoires de recherche et développement. Si le nom est pompeux, son principe est simple ; les objets sont imprimés avec plusieurs matériaux et la forme générale est le résultat de changement de forme de l'objet en fonction de son environnement – par exemple un contact avec de l'eau ou un apport d'énergie (Tribot, 2013). Tibbits, fondateur du "Self Assembly Lab" du MIT, explique : « Nous sommes en train de regarder les possibilités de programmer

des matériaux physiques et biologiques pour qu'ils changent de forme, changent de propriétés » (Wainwright, 2013). Avec cette technologie, la frontière entre le software et le hardware devient de plus en plus ténue. Les objets issus de cette méthode de fabrication offrent adaptabilité et dynamisme à leur environnement.

« La partie la plus excitante sont les nombreuses applications qui peuvent émerger de ce travail. Ceci est non seulement un projet apprécié ou une solution intéressante, mais quelque chose qui peut changer la vie de beaucoup de gens. Dans l'avenir, nous imaginons une large gamme d'applications possibles »

(Raviv, 2014).

L'armée américaine a décidé de financer des recherches dans le domaine pour 855.000 dollars. Elle y voit un côté pratique, à long terme, pour ses troupes (Campbell-Dollaghan, 2013). Des applications civiles pourraient voir le jour, comme une tuyauterie capable de faire avancer de l'eau grâce à ses déformations, sans usage de pompes (Rieland, 2014).

SECTION 4 : ANALYSE DES INTERVIEWS

Avec l'objectif de confirmer, ou d'infirmer, certains résultats et appréciations rencontrés dans les sections précédentes, un entretien a été réalisé avec des personnes familières au secteur de l'impression tridimensionnelle. Pour ce mémoire, cinq interviews ont été conduites de façon individuelle, durant en moyenne une cinquantaine de minutes. Grâce à l'aide théorique fournie par l'ouvrage de Geneviève Imbert (2010) et le cours d'analyse qualitative du professeur Christophe Lejeune, un guide d'entretien fut réalisé afin de permettre une cohérence lors des rencontres avec les différents intervenants. Toutes les interventions furent enregistrées et retranscrites afin d'en faciliter l'exploitation (cfr. Annexe E).

Profils des répondants

Les profils des répondants sont variés au sein de l'univers 3D, tous ayant en commun un intérêt certain pour les technologies et/ou applications de celle-ci.

- 1) Le premier répondant travaille dans une multinationale active en partie dans l'impression 2D – Ricoh Belgium – et qui cherche à lancer son offre 3D. La Belgique est vue comme un excellent marché test à l'échelle de l'Europe pour affiner sa proposition. Le rôle de cette personne était de préparer le lancement de ces produits. Le parallèle qu'elle fait de l'avènement de l'impression 3D avec le monde des copieurs 2D est intéressant.
- 2) Un membre de l'équipe marketing de MyMiniFactory (MMF), la seconde plus grande plateforme mondiale d'échange de fichiers numériques 3D sur Internet, a bien voulu répondre aux questions. Son point de vue est légèrement différent du reste des répondants de par son éclairage très axé sur les services numériques gravitant autour de l'AM.
- 3) La troisième personne était active dans le secteur de l'impression digitale sur papier. Elle a vu l'avènement de la 3D comme une opportunité pour lancer sa propre offre de service d'impression tridimensionnelle à destination des orthodontistes.
- 4) L'avant-dernier répondant est un maquettiste qui a investi dans de l'équipement 3D afin de pouvoir répondre à d'éventuelles commandes de ses clients et pour augmenter sa productivité. Capable de démonter des appareils électroniques –

comme des drones grand public – afin d’en comprendre le fonctionnement ou de les améliorer, il incarne bien le ‘Maker Mouvement’. Il possède plusieurs machines ayant des techniques de fonctionnement différentes, FFF et stéréolytographie, afin de coller au mieux à ses besoins. Précédemment il faisait appel à des services d’impression pour ses besoins en pièces 3D.

- 5) Finalement, la dernière personne a acheté une machine FFF au début de la commercialisation aux particuliers en Belgique. C’est un « early adopter » pour beaucoup de matériel technologique. Médecin, le répondant cherche à approfondir sa connaissance et son aisance vis-à-vis de la technologie afin de développer un service à destination de ses collègues.

Analyse

Les répondants ont tous une bonne connaissance des techniques et du marché de l’impression tridimensionnelle. Tous ont accès à de l’équipement 3D soit directement parce qu’ils en possèdent à titre privé soit indirectement via leur employeur. Une curiosité vis-à-vis des nouvelles technologies les a poussés à s’intéresser au marché potentiel que représente l’AM qui est d’une façon ou d’une autre associé à leur activité.

Les bénéfices retirés actuellement de l’utilisation de machine d’AM ne sont pas encore tous ressentis. C’est le cas pour la personne travaillant chez Ricoh Belgium, qui attend d’avoir plus de retour de ses clients et d’expérience en interne. C’est moins le cas pour les répondants qui offrent des services dont l’impression 3D est un support. Notamment pour la personne de MMF dont les tests d’imprimabilité de modèles et leur partage représente le « core business ». Même chose pour le maquettiste qui est enthousiaste quant aux possibilités offertes par ses machines et leur relative autonomie. Lorsqu’elles fonctionnent, il peut se consacrer à d’autres projets car, relativement fiable, son équipement n’a pas besoin de supervision. De plus, cela lui permet « *de sortir des pièces qui sont très complexes à faire à la main* ». L’avis est partagé par le chirurgien qui explique pouvoir « *faire confiance à une mécanique qui est fine* ». Capable d’imprimer jusqu’à 20 microns d’épaisseur, il a pu réaliser des concepts de prothèses et des pincettes médicales. Bien qu’il ne pourra pas les utiliser en pratique, c’est une bonne méthode, selon lui, pour faire des prototypes et proposer des adaptations d’outils standards à sa morphologie.

À l'inverse, des désavantages sont aussi relevés par les parties. Le coût des machines bas de gamme (principalement du FFF) est encore souvent considéré comme trop élevé. Le responsable marketing chez MMF se dit prêt à acheter une machine à moins de 500 euros si c'est une solution propriétaire – « *En gros sous 1500€ aujourd'hui, tu auras toujours pas mal d'entretien/calibration à faire et je pense que ça pourrait me décourager. C'est comme monter son PC, je sais qu'on peut faire des trucs de fou pour moins cher si on assemble soi-même, mais je suis plus du genre "plug and play", enfin "plug and print" du coup* ». Le répondant maquettiste espère que les objets produits avec ces machines seront de meilleure qualité à court terme afin de dégager une meilleure valeur ajoutée et rentabiliser plus rapidement ses investissements. Le répondant de Ricoh Belgium pense qu'une évolution similaire à celle qu'il y a eu dans le monde des copieurs va arriver à moyen terme en ce qui concerne les prix des équipements. « *Je crois que les prix vont augmenter un peu* » explique-t-il, parce que les possibilités offertes vont être plus nombreuses (multi-matière, multi-couleur, etc.).

Perception des coûts de l'équipement 3D

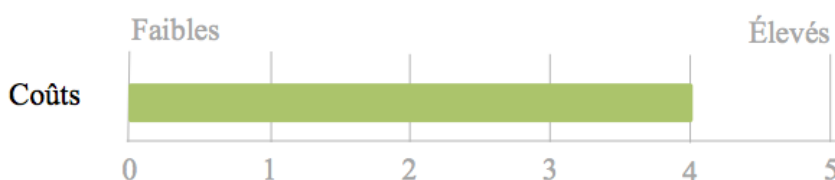


Figure 21 – Le matériel d'impression tridimensionnel est encore perçu comme relativement cher par la plupart des répondants. Figure basée sur les entretiens.

Les possibilités techniques sont les plus souvent citées comme éléments pouvant bénéficier d'améliorations. Les éléments suivants ont été cités : la vitesse d'impression, la fiabilité et la possibilité d'utiliser plusieurs matériaux et plusieurs couleurs, ainsi que la facilité d'utilisation. Paradoxalement, la vitesse relativement lente des équipements n'est pas perçue comme une contrainte par tous les répondants. L'employée de Ricoh Belgium explique que « *le temps [d'impression] n'est pas le plus important à mon sens, il existe déjà des technologies plus rapides. Je pense que la fiabilité et les possibilités sont plus importantes. Si tu veux imprimer quelque chose, un taux de réussite d'impression proche de 100% est important* ». Ce raisonnement est suivi par le maquettiste et le médecin qui cherchent à obtenir des pièces conformes à leurs attentes du premier coup. Cependant, ce point de vue n'est pas partagé par le marketeur de MMF, car une vitesse plus élevée

permettrait de tester plus de modèles et d'ajouter plus rapidement du contenu à la plateforme. Le troisième répondant appelle aussi à une cadence d'impression améliorée. Tous sont convaincus qu'à court terme les équipements d'AM gagneront en célérité et en fiabilité.

La possibilité d'utiliser plusieurs couleurs est aussi un aspect qui va connaître une rapide évolution selon les personnes interrogées. Pourtant ce n'est pas la priorité de tous (trois personnes sur les cinq estiment que cela serait une amélioration souhaitable). À l'inverse, le multi-matière est considéré comme un aspect plus important. Chez Ricoh Belgium cette avancée est qualifiée de « *grand pas en avant* » et annonce, à moyen terme, la possibilité « [d'] *imprimer en une pièce des éléments intégrés en une fois avec tous les avantages 3D : customisation et autres* ». La matière première ne va plus se limiter à des filaments de plastiques pour les machines FFF et va monter en gamme. La possibilité d'imprimer en métal ou d'autres matériaux est souhaitée par le maquettiste et le médecin afin d'étendre les applications possibles.

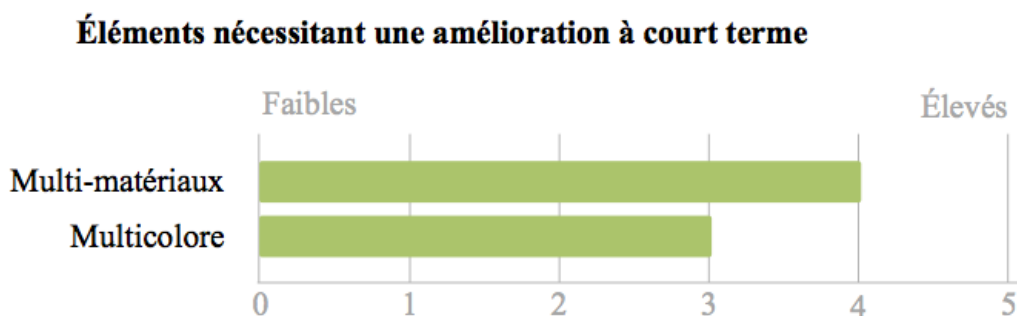


Figure 22 – Importance des éléments nécessitant une amélioration à court terme. Figure basée sur les entretiens.

La facilité d'utilisation est également un critère que certains répondants réclament. C'est le cas pour l'employé de MMF qui demande des machines « *plug and play* ». Le médecin est d'accord avec ce point et qualifie cet aspect comme « *indispensable pour l'utilisateur lambda. Si tu offres une imprimante à tous les habitants de la rue et qu'ils ne savent pas la faire fonctionner au premier clic, je suis persuadé qu'ils abandonnent* ». La personne de chez Ricoh Belgium nuance toutefois et explique qu'un effort doit être consenti par les écoles et les universités pour familiariser les jeunes à la technologie. Le fait de donner des cours sur le sujet, par exemple, permettra de rendre moins complexes aux yeux des utilisateurs les procédures à suivre pour l'impression 3D. Les effets ne se

feront alors sentir qu'à moyen et long terme. Pour le répondant sortant du monde de l'impression 2D, cet aspect est très secondaire, car il ne s'agit pas d'une offre grand public et la complexité fait partie du processus. Le maquettiste appelle aussi à plus de simplicité, mais craint que cela n'impacte son activité en permettant à ses clients de réaliser eux-mêmes leurs créations.

Tous anticipent une évolution rapide du marché, mais ils ne partagent pas l'idée d'une diffusion massive de l'équipement d'impression 3D auprès des particuliers. Pour la responsable chez Ricoh Belgium et le maquettiste, « *les machines 3D [sont] un futur objet à la maison. Il y a un an, une étude aux États-Unis a essayé de justifier l'achat d'une machine 3D, avec toutes les pièces que l'on sait imprimer et qui évite de devoir aller acheter au magasin, ils ont dit que c'était déjà rentable. Certaines pièces seulement, c'est certain, mais quand même !* ». Le marketer de MMF rejoint cette idée et explique la transition qui va s'opérer, selon lui, au travers des 'copy shops' : « *je pense que ça sera comme les cyber cafés ou copy centers, ça servira le temps que tout le monde s'équipe ainsi que pour utiliser des machines de niche (impression en or par exemple)* ». Pour le troisième répondant, les particuliers utiliseront des imprimantes 3D pour customiser des « templates » d'objets, des lunettes par exemple. « *Le fabricant dira dans quelles conditions il faut imprimer, avec quelle imprimante, avec quels matériaux et alors les lunettes seront certifiées et garanties. Ce marché doit être créé par les fabricants parce que ce sont eux qui ont les ressources nécessaires pour créer de l'awareness* ». Il insiste beaucoup sur la nécessité de ne pas se cantonner à la simple production et vente de machines, mais à offrir des services à haute valeur ajoutée. Il est rejoint par l'analyse du travailleur pour MMF pour qui « *la vente de machines est une bonne activité de support, mais la vraie création de valeur viendrait des services liés* ». Le dernier répondant, le médecin, est lui sceptique à l'idée d'une adoption massive par les particuliers. Le manque de connaissances techniques et le temps nécessaire pour les acquérir est un frein énorme, d'après lui. Par contre, il adhère à l'opinion en faveur de l'importance des services. Selon lui, de nouveaux business modèles vont voir le jour, amenant leur lot de nouvelles professions parmi lesquelles celle de 'design maker', une personne capable de réaliser des modèles sur commande pour particuliers. L'impression 3D sera très fortement utilisée dans l'industrie pour répondre à un besoin des individus de mass-customisation.

CONCLUSION

Ce mémoire avait comme but de dresser un panorama objectif du marché de l'impression 3D. Cet examen approfondi a confirmé que l'impression 3D connaît des changements impressionnants qui ne sont pas prêt de se terminer, même si ses effets annoncés sont souvent surestimés.

Les secteurs industriels représenteront un parc de machines inférieur à celui détenu par les particuliers mais pour une valeur bien supérieure. L'impression tridimensionnelle pour particuliers a franchi le pic des espérances excessives du 'hype cycle' de Gartner. La croissance sera toujours au rendez-vous et les prix des équipements resteront à la baisse. Les fabricants de matériel font maintenant face à un défi de taille. Le marché va connaître une consolidation importante et les entreprises les moins concurrentielles vont être balayées du marché. Ricoh, Canon, HP et d'autres acteurs du monde 2D ont décidé d'entrer sur le marché en distribuant des machines de constructeurs existants ou en proposant leur propre équipement. Cette arrivée va vraisemblablement bouleverser les fragiles équilibres existants, des acquisitions de leaders historiques n'étant pas à exclure.

Des évolutions techniques majeures sont attendues à court terme. Les techniques industrielles sont à la portée des particuliers via des services d'impression facilement accessibles en ligne. Les progrès vont se faire sentir sur tous les fronts, la possibilité d'imprimer plusieurs matériaux et avec plusieurs couleurs est le plus grand souhait des personnes interrogées. Chez les particuliers, la vitesse lente de création des objets n'est pas considérée comme une contrainte, au contraire, elle responsabilise les individus relativement à leur utilisation des machines. Cet aspect est encore atténué par une fiabilité grandissante de l'équipement, signifiant un taux d'impressions réussies de plus en plus élevé. Les logiciels nécessaires à la création de designs et au 'slicing' représentent un enjeu important et des méthodes et standards optimisés exclusivement pour l'impression 3D sont en passe de devenir réalité.

Le marché n'est pas à l'abri de nouvelles techniques d'impressions 3D reposant sur des principes encore inexplorés qui changeraient la donne quant aux possibilités offertes – la technologie CLIP est à ce propos très prometteuse. De plus, des technologies

autrefois réservées à l'industrie commencent à être à la portée des particuliers, avec la stéréolithographie ou le 'digital light processing' par exemple.

L'impression 3D va également avoir un impact socioéconomique de plus en plus important à moyen terme. Certains secteurs vont connaître des changements dans leurs chaînes de production en intégrant l'AM, leur importance variera fortement en fonction des industries. De nouveaux services vont également voir le jour. Les services d'impression tridimensionnelle à destination des particuliers vont se multiplier et se spécialiser. En plus des industries de production, de nombreux autres secteurs – la livraison, la distribution, etc – vont aussi être ébranlés par des changements comportementaux qui affecteront les emplois et leur rentabilité. Une demande grandissante de personnel hautement qualifié est nécessaire pour accompagner cette transition et pour occuper les nouvelles catégories de fonctions nécessaires à l'impression 3D. La demande ne se tarira vraisemblablement pas à long terme.

Un changement dans les habitudes de consommation des particuliers va se faire sentir. Un individu se demandera premièrement s'il peut produire ce dont il a besoin et s'il peut personnaliser son modèle – sur une machine qu'il possède, dans un Fablab ou copy shop. La difficulté de créer des modèles numériques est vue par beaucoup comme un frein à son adoption massive. Ce défi pourra être contourné par la possibilité de personnaliser des fichiers existants récupérés en ligne, gratuitement ou pas, ou en passant par les services d'une personne qualifiée – comme c'est le cas avec la 2D.

Le sujet de ce mémoire touche à un thème très récent et encore peu étudié, les possibilités de recherches futures sont nombreuses et vastes. Le secteur connaît une évolution rapide, les changements et nouvelles applications arrivant à un rythme soutenu. Cela amène la question de la recherche de business modèles efficaces et capables de gérer ces mutations. L'AM soulève également des questions légales que et les solutions qui pourront être mises en place sont un sujet intéressant et mériteraient un approfondissement. Le développement de la législation ainsi que des standards internationaux sera crucial pour le futur de l'impression 3D.

BIBLIOGRAPHIE

3D Printing Industry. (2014). *The free beginner's guide to 3D printing*. New York, NY : 3D Printing Industry.

3D printing, robotics and technology fund. (sd). <http://www.3dpfund.com/portfolio/>, consulté le 22 juillet 2015.

3D Systems. (2001). *Annual Repport*. En ligne http://www.3dsystems.com/company/investor/annual_2001.pdf, consulté le 19 avril 2015.

3D Systems. (2012). *3D Systems finalise l'acquisition de Z Corp et Vidar*. En ligne sur le site de 3D Systems <http://www.zcorp.com/fr/Press-Room/3D-Systems-Completes-Acquisition-of-Z-Corporation/news.aspx>, consulté le 19 février 2015.

Additive 3D. (sd). *The rapid prototyping patent museum*. En ligne http://www.additive3d.com/museum/mus_2.htm, consulté le 5/11/2014.

Agarwala, M., Andreev, Y. et al. (2012). *Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry; Annual Worldwide Progress Report*. Fort Collins, CO : Wohlers Associates.

Allard, F. sd. *L'impression 3D au coeur de l'innovation manufacturière de Nike*. En ligne <http://www.zesmallfactory.com/news/impression-3d-innovation-manufacturiere-nike/>, consulté le 9 juillet 2015.

Allard, F. sd. *New Balance travaille sur l'impression 3D de chaussures*. En ligne <http://www.zesmallfactory.com/news/391-new-balance-travaille-sur-limpression-3d-de-tennis/>, consulté le 9 juillet 2015.

Allen, J. (2006). *An investigation into the comparative costs of additive manufacture vs machine from solid for aero engine parts. Cost effective manufacture via net-shape processing*, 17, 1-10. Neuilly-sur-Seine: RTO.

Allison, A., Scudamore, R. (2014). *Additive manufacturing : strategic research agenda*. AM Platform : Turin.

AM platform. (sd). *What is the AM-platform?* En ligne <http://www.rm-platform.com/index.php/management>, consulté le 12/03/2015.

America Makes, (sd). *About america makes*. En ligne <https://americamakes.us/about/overview>, consulté le 15 juillet 2015.

Anderson, C. (2012). *Makers : la nouvelle révolution industrielle*. Pearson.

Arte. (2014). *Les imprimantes 3d : une révolution ?* En ligne <http://future.arte.tv/fr/sujet/les-imprimantes-3d>, consulté le 24 avril 2014.

- ASTM International. (2013). *Standard terminology for additive manufacturing technologies, designation F2792 – 12a*. p2.
- Baechler, C., DeVuono, M., & Pearce, J. M. (2013). *Distributed recycling of waste polymer into RepRap feedstock*. *Rapid Prototyping Journal*, 19(2), 118-125. Doi : <http://dx.doi.org/10.1108/13552541311302978>
- Bajarin, T. (2014). *Why the maker movement is important to america's future*. En ligne sur le site du Time <http://time.com/104210/maker-faire-maker-movement/>, consulté le 18 juillet 2015.
- Barack, O. (2013). *Remarks by the President in the State of the Union Address*. En ligne sur le site de la Maison-Blanche <https://www.whitehouse.gov/the-press-office/2013/02/12/remarks-president-state-union-address>, consulté le 10 avril 2015.
- Basilieri, P. (2014). *How 3-D printing disrupts business and creates new opportunities*, Gartner.
- Basilieri, P., & Shah, Z. (2014). *3D Printer Market Survey Reveals Enterprise Demand Drivers for Technology, Printer and Vendor Decision Making*. Gartner.
- Basilieri, P., Shah, Z., & Li, Y. (2013). *Forecast: 3D Printers, Worldwide, 2013*. Stamford, CT. Gartner.
- Bean, T. (2015). *Share and share alike: 9 places to find 3d printing designs*. En ligne <http://printspace3d.com/share-share-alike-9-places-find-3d-printing-designs-like-thingiverse/>, consulté le 7 juin 2015.
- Bengtson, T. (2014). *Why the retail and shipping industries should fear 3d printing*. En ligne <http://3dprint.com/2444/retail-shipping-industries-fear-3d-printing/>, consulté le 14 juillet 2015.
- Berchon, M & Luyt, B. (2014). *L'impression 3D* (2è éd.). Paris : Eyrolles.
- Biggs, J. (2013). *Shapeways introduces new squishy 3D printing material, elasto plastic*. En ligne <http://techcrunch.com/2013/05/31/shapeways-introduces-new-squishy-3d-printing-material-elasto-plastic/>, consulté le 17 février 2015.
- Birtchnell, T., Urry, J., Cook, C., & Curry, A. (2013). *Freight miles: the impact of 3D printing on transport and society*.
- Blin, S. (2014). *La Nasa envoie un outil par mail dans l'espace*. En ligne sur le site du Figaro <http://www.lefigaro.fr/sciences/2014/12/23/01008-20141223ARTFIG00168-la-nasa-envoie-un-outil-par-mail-dans-l-espace.php>, consulté le 7 avril 2015.
- Boggeri, A. & al (2014). *The future of 3-D printing: Moving beyond prototyping to finished products*. in *Technology forecast*. PricewaterhouseCoopers LLP : DL.

Boggeri, A., Pearce, J., Martinez, G., Liang, N., Duoss, E. & Furstoss, C. (2014). *The future of 3-D printing: Moving beyond prototyping to finished products. Technology forecast*. PricewaterhouseCoopers : DL.

Bradshaw, S., Bowyer, A., & Haufe, P. (2010). *The intellectual property implications of low-cost 3D printing*. ScriptEd, 7(1), 5-31.

Business Wire. (2012). *Gartner's 2012 hype cycle for emerging technologies identifies "tipping point" technologies that will unlock long-awaited technology scenarios*. En ligne <http://www.businesswire.com/news/home/20120816005365/en/Gartners-2012-Hype-Cycle-Emerging-Technologies-Identifies#.Va49PRPtIBc>, consulté le 6 juin 2015.

Campbell-Dollaghan, K. (2013). *Why is the us army investing in 4d printing?*. En ligne <http://gizmodo.com/why-is-the-us-army-investing-in-4d-printing-1442964294>, consulté le 8 avril 2015.

Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O., & Garrett, B. (2011). *Could 3D printing change the world. Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing*, Atlantic Council, Washington, DC.

Canalys, (2014). *3D printing market to grow to US\$16.2 billion in 2018*. En ligne <http://www.canalys.com/newsroom/3d-printing-market-grow-us162-billion-2018>, consulté le 14 juillet 2015.

Caselli, F., & II, W. J. C. (2001). *Cross-country technology diffusion: The case of computers* (No. w8130). National bureau of economic research.

Chantrel, F. (2013). *Quels sont les objets 3D les plus populaires ?* En ligne <http://www.monunivers3d.com/1730/>, consulté le 19 février 2015.

Chilson, L. (2012). *Comparing entry level 3d printers*. En ligne <http://www.protoparadigm.com/news-updates/comparing-entry-level-3d-printers/>, consulté le 10 juillet 2015.

Chirgwin, R. (2012). *Patent suit targets Formlabs and Kickstarter : 3D Systems lays out claim over stereolithography*. En ligne http://www.theregister.co.uk/2012/11/22/3d_systems_sues_formlabs_and_kickstarter/, consulté le 17/03/2015.

Choi, C. (2014). *'4D printing' Makes shape-shifting structures*. En ligne <http://www.livescience.com/49185-4d-printing-shape-shifting-structures.html>, consulté le 18 juillet 2015. Citation de Raviv, D, mathématicien au MIT.

Christensen, C. (1997). *The innovator's Dilemma*. Harvard Business School Press.

Chun-shien, L., (2004). *Multimedia Security: Steganography and Digital Watermarking Techniques for Protection of Intellectual Property*. Hershey, PA : Idea Group Publishing.

- Cooke, C. (2012). *Guns don't kill people, 3-D printers do*. En ligne <http://www.nationalreview.com/corner/312627/guns-dont-kill-people-3-d-printers-do-charles-c-w-cooke>, consulté le 17avril 2014.
- Cotteleer, M. & Joyce, J. (2014). *3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth*. Deloitte Review.
- Cotteleer, M., Coykendall, J., Holdowsky, J., & Mahto, M. (2014). *3D opportunity in aerospace and defense*. Westlake, TX : Deloitte University.
- Cotteleer, M., Crane, J. & Crestani, R. (2014). *3D opportunity for end-use products*. Westlake, TX : Deloitte University.
- Cotteleer, M., Crane, J., & Neier, M. (2014). *3D opportunity in tooling*. Westlake, TX : Deloitte University.
- Cotteleer, M., Holdowsky, J., & Mahto, M. (2014). *The 3D opportunity primer: the basics of additive manufacturing*. Westlake, TX : Deloitte University.
- Cotteleer, M., Kotek, B., & Snyder, G. (2014). *3D opportunity in medical technology*. Westlake, TX : Deloitte University.
- Cotteleer, M., Openshaw, E. (2014). *3D printing : A powerful technology, but no panacea*. Financial Times.
- Create it Real. (2015). *Fiche produit*. En ligne sur le site du fabricant <http://www.createitreal.com/index.php/products/electronic>, consulté le 10 juillet.
- Crump, S. S. (1992). *U.S. Patent No. 5,121,329*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Deckard, C. R. (1989). *U.S. Patent No. 4,863,538*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Depoorter, B. (2014). *Intellectual property infringements & 3D printing: decentralized piracy*. 65 Hastings L.J. 1483, 1486.
- Directive 98/71/CE du Parlement européen et du Conseil sur la protection juridique des dessins ou modèles. (1998). Journal officiel n° L 289, 28 octobre. p.28-35. doi 10.3917/rsi.102.0023
- Doherty, D. (2012). Downloading infringement: patent law as a roadblock to the 3d printing revolution. 26 Harv. J.L. & Tech. 360-361.
- Dougherty, D. (2012). *The maker movement*. *innovations*, 7(3), 11-14.
- Dunham, S. (2014). *Additive manufacturing opportunities in the automotive industry: a ten-year forecast*. Charlottesville, VA : SmartechMarket publishing.

- Earls, A. & Baya, V. (2014). *Software innovations: Simplifying the 3-D printing experience*. PwC Technology Forecast. 3. PricewaterhouseCoopers.
- Earls, A. & Baya, V. (2014). *The road ahead for 3-D printers*. PwC Technology Forecast. 8. PricewaterhouseCoopers.
- Edwards, J. & Lange, J., (2014). *Obama manufacturing hubs face uphill struggle to create jobs*. En ligne sur le site de Reuters <http://www.reuters.com/article/2014/03/18/us-usa-obama-manufacturing-idUSBREA2H24H20140318>, consulté le 15 juillet 2015.
- ESA. (2013). *Construire une base lunaire en impression 3D*. En ligne sur le site de l'ESA http://www.esa.int/fre/ESA_in_your_country/France/Construire_une_base_lunaire_en_impression_3D, consulté le 21 juillet 2015.
- Eveland, J. D. (1979). *Issues in using the concept of adoption of innovations'*. *Journal of Technology Transfer*, 4(1), 1-13.
- Fab Foundation. (sd). *Localisation des FabLabs* <http://www.fabfoundation.org/fab-labs/>, consulté le 15 juin 2015.
- Fagerberg, J., & Godinho, M. M. (2005). *Innovation and catching-up*. *The Oxford Handbook of Innovation*. Oxford University Press, New York, 514-543.
- Fenn, J., & Raskino, M. (2008). *Mastering the hype cycle: how to choose the right innovation at the right time*. Harvard Business, Cambridge.
- Ferrier, M. (2014). *Francis Bitonti, the dress designer applying architecture to 3D printed couture*. En ligne sur le site du Guardian <http://www.theguardian.com/technology/2014/sep/22/fashion-dress-made-3d-printer>, consulté le 30 mars 2014.
- Finocchiar, C. W. (2013). *Personal Factory or Catalyst for Piracy? The Hype, Hysteria, and Hard Realities of Consumer 3-D Printing*, 31 *Cardozo arts & ent. L.J.* 480.
- Foster, R., Kaplan, S. (2001). *Creative destruction: why companies that are built to last underperform the market, and how to successfully transform them*. New York, NY : Doubleday.
- Freedonia. (2013). *World 3D Printing : Additive Manufacturing*. Cleveland, OH.
- Frey, T. (2012). *2 Billion Jobs to Disappear by 2030*. En ligne <http://www.futuristspeaker.com/2012/02/2-billion-jobs-to-disappear-by-2030/>, consulté le 12 juillet.
- Gangula, B., Giffi, C., & Illinda, P. (2014). *3D opportunity in the automotive industry*. Westlake, TX : Deloitte University.
- Gartner. (2014). *Gartner's 2014 hype cycle for emerging technologies maps the journey to digital business*. En ligne sur le site de Gartner <http://www.gartner.com/newsroom/id/2819918>, consulté le 2 mai 2015.

- Gartner. (2013). *Gartner says early adopters of 3d printing technology could gain an innovation advantage over rivals*. En ligne sur le site de Gartner <http://www.gartner.com/newsroom/id/2388415>, consulté le 19 juillet 2015.
- Gartner. (2014). *Gartner says consumer 3d printing is more than five years away*. En ligne sur le site de Gartner <http://www.gartner.com/newsroom/id/2825417>, consulté le 2 mai 2015.
- Gartner. (2014). *Gartner says worldwide shipments of 3d printers to reach more than 217,000 in 2015*. Stamford, CT.
- Gerlache, A. (2013). *Fabriquez votre arme avec une imprimante 3D*. En ligne sur le site de la RTBF http://www.rtf.be/info/chroniques/detail_fabriquez-votre-arme-avec-une-imprimante-3d-alain-gerlache?id=7990176, consulté le 17 avril 2014.
- Gholipour, B. (2013). *3D printing on mars could be key for martian colony*. En ligne sur le site Space <http://www.space.com/23059-3d-printing-mars-colony.html>, consulté le 7 avril 2015.
- Gibbs, S. (2014). *Royal Mail launches 3D-printing service*. En ligne sur le site du Guardian <http://www.theguardian.com/technology/2014/dec/09/royal-mail-launches-3d-printing-service>, consulté le 14 juillet 2015.
- Gizmo 3D Printers. (sd). *Fiche produit*. En ligne sur le site du fabricant <http://www.gizmo3dprinters.com.au/>, consulté le 10 juillet.
- Google. (2015). *Tendance de recherche*. En ligne <http://www.google.com/trends/explore#q=3D%20printing&cmpt=q&tz=>, consulté le 7 mai 2015.
- Google. (2015). *Tendance de recherche*. En ligne <http://www.google.com/trends/explore#q=3D%20print&cmpt=q&tz=>, consulté le 7 mai 2015.
- Greenberg, A. (2013). *3D-printed gun's blueprints downloaded 100,000 times in two days (with some help from Kim Dotcom)*. En ligne sur le site de Forbes <http://www.forbes.com/sites/andygreenberg/2013/05/08/3d-printed-guns-blueprints-downloaded-100000-times-in-two-days-with-some-help-from-kim-dotcom/>, consulté le 22 juillet 2015.
- Grynol, B., (2013). *Disruptive manufacturing: The effects of 3D printing*. Ontario : Deloitte.
- Guillemot, F. (2013). *Les promesses de l'impression 3D pour la recherche médicale*. En ligne sur le site du Figaro <http://sante.lefigaro.fr/actualite/2013/05/07/20484-promesses-limpression-3d-pour-recherche-medicale>, consulté le 17 mai 2015.
- Hague, R.J.M., Reeves, P. E. (2000). *Rapid prototyping, tooling and manufacturing*. Akron, OH : Rapra Technology Ltd.

Hall, B. H., & Khan, B. (2003). *Adoption of new technology* (No. w9730). National Bureau of Economic Research.

Heller, S. (2014). *Why 3-D printing is crucial to ford motor company's survival*. En ligne <http://www.fool.com/investing/general/2014/01/19/why-3-d-printing-is-crucial-to-ford-motor-companys.aspx>, consulté le 19 mai 2015.

Hensley, M. (2014). *5 Most successful 3d printer crowdfunding projects of all-time*. En ligne sur le site 3D Print <http://3dprint.com/294/5-most-successful-3d-printer-crowdfunding-projects-of-all-time/>, consulté le 7 mai 2015.

Hergel, J., & Lefebvre, S. (2014). *Clean color: Improving multi-filament 3D prints*. *Computer Graphics Forum* (Vol. 33, No. 2, pp. 469-478).

Hertel, O. (2014). *Quand l'imprimante façonne le vivant*. En ligne sur le site de Science et Avenir <http://www.sciencesetavenir.fr/sante/20140414.OBS3834/quand-l-imprimante-faconne-le-vivant.html>, consulté le 15 janvier 2015.

Hiemenz, J. (2013). *3D printing jigs, fixtures and other manufacturing tools*. Eden Prairie, MN : Stratasys.

Hornick, J. & Roland, D. (2013). *Many 3D printing patents are expiring soon: here's a round up & overview of them*. En ligne sur le site 3D Printing Industry <http://3dprintingindustry.com/2013/12/29/many-3d-printing-patents-expiring-soon-heres-round-overview/>, consulté le 16/03/2015.

Notteau, Y. (2015). *Trouvez chaussure à votre pied grâce à l'impression 3D*. En ligne <http://www.additive.com/actualites/2015-03-02/trouvez-chaussure-a-votre-pied-grace-a-l-impression-3d>, consulté le 07 juillet 2015.

Hull, C. W. (1986). *U.S. Patent No. 4,575,330*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Hunt, E., Zhang, C., Anzalone, N. & Pearce, J. (2015). *Polymer recycling codes for distributed manufacturing with 3-D printers*. *Resources, Conservation and Recycling*. 97: 24 DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.02.004

Imbert, G. (2010). *L'entretien semi-directif : à la frontière de la santé publique et de l'anthropologie*. *Recherche en soins infirmiers*. (N° 102), p. 23-34.

Ishengoma, F. & Mtaho, A. (2015). *3D Printing: Developing Countries Perspectives*. *International Journal of Computer Applications*, 104(1).

Jeffries, A. (2012). *Former Makerbot COO is selling his own 3D home printer, which starts at just \$500*. En ligne <http://observer.com/2012/04/former-makerbot-coo-starts-selling-his-own-3d-home-printer-which-starts-at-500/>, consulté le 17 avril 2014.

Joyce, J., Louis, M., & Seymour, T. (2014). *3D opportunity in the Department of Defence*. Westlake, TX : Deloitte University.

Khatiwala, C., Law, R., Shepherd, B., Dorfman, S., & Csete, M. (2012). *3D cell bioprinting for regenerative medicine research and therapies*. *Gene Therapy and Regulation*, 7(01), 1230004.

Kickstarter. (sd). *Recherche de projets relatifs à l'impression 3D*. En ligne <https://www.kickstarter.com/projects/search?term=3d+printer>, consulté le 1 juin 2015.

King, M. (2013). *Of labour, unions and 3d printing*. Arbitragemagazine. Comporte une citation de Vivek Wadhwa.

Kraftwurx. (sd). *Sam Cervantes et sa compagnie Solidoodle visent à faire imprimantes 3D abordable et facile à utiliser*. En ligne <http://www.kraftwurx.com/fr/3d-model-printing/3d-printing-news/1729-former-makerbot-coo-is-selling-his-own-3d-home-printer-which-starts-at-just-500>, consulté le 15/01/2015.

Krassenstein, B. 2014. *3D printing: employment boom or employment swoon?*. En ligne <http://3dprint.com/3980/3d-printing-jobs-economy/>, consulté le 14 juillet 2015.

Kurzweilai. (2015). *Open-source algorithms to enable high-quality 3D printing of metal parts*. En ligne <http://www.kurzweilai.net/open-source-algorithms-to-enable-high-quality-3d-printing-of-metal-parts>, consulté le 9 juillet 2015.

Lai, E. (2008). *The '640K' quote won't go away -- but did Gates really say it?* En ligne <http://www.computerworld.com/article/2534312/operating-systems/the--640k--quote-won-t-go-away---but-did-gates-really-say-it-.html>, consulté le 20/03/2015.

Larkin, M., Hagan, A., Hadzilacos, R. (2015). *Top 10 Emerging Technologies of 2015*. Genève : World Economic Forum.

Laseter, T. & Hutchison-Krupat, J. (2014). *Impression tridimensionnelle : calmer le jeu !*. *L'Expansion Management Review* 2/2014 (N° 153). p. 34-41.
DOI : 10.3917/emr.153.0034.

Laubacher, P. 2012. *L'imprimante 3D, cette révolution industrielle qui approche*. En ligne sur le site du Nouvel Obs <http://obsession.nouvelobs.com/high-tech/20121019.OBS6327/l-imprimante-3d-cette-revolution-industrielle-qui-approche.html>, consulté le 13 juillet 2015.

Le Monde. (2013). *Création de la première arme imprimée en métal*. En ligne sur le site du Monde http://www.lemonde.fr/technologies/article/2013/11/08/creation-de-la-premiere-arme-imprimee-en-metal_3510891_651865.html, consulté le 24 avril 2014.

Le Monde. (2013). *La Poste se lance dans l'impression 3D*. En ligne http://www.lemonde.fr/societe/article/2013/11/27/la-poste-se-lance-dans-l-impression-3d_3520839_3224.html#TvWyfmTqOdSfBgUM.99, consulté le 14 juillet 2015.

Leapfrog. (sd). *MAXX Economy Glow in the Dark PLA*. En ligne sur le site du fabricant <http://www.lpfrg.com/pla-maxx-glow-in-the-dark>, consulté le 17 février 2015.

- Leblanc, R. (Réalisateur). (1972). *Tintin et le Lac aux requins* [Animation]. Belgique, France : Associated Artists.
- Lee, P & Ducan, S. (2012) *Technology, media & telecommunication : predictions 2012*. London : Deloitte. p15.
- Lee, P., Stewart, D. (2015). *3D printing is a revolution: just not the revolution you think*. London : Deloitte.
- Lejeune, C. (2014). *Analyse qualitative*. Séminaire d'accompagnement du
Lipson, H., & Kurman, M. (2013). *Fabricated: The new world of 3D printing*. John Wiley & Sons.
- Lynskey, D., & White, G. (2013). *Economic analysis of additive manufacturing for final products: An industrial approach*. University of Pittsburgh.
- MakerGeeks. (sd). *Conductive abs 3D filament*. En ligne sur le site du fabricant <http://www.makergeeks.com/coabs3dfi10.html>, consulté le 19 février 2015.
- Manyika, J., Chui, M., Bughin, J., Dobbs, R., Bisson, P., & Marrs, A. (2013). *Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy* (Vol. 180). San Francisco, CA, USA: McKinsey Global Institute.
- Marketsandmarkets. (2014). *3D Printing Materials Market by Plastics (Photopolymers, ABS, PLA, Nylon, & Others), by Metals (Steel, Silver, Aluminum & Others), by Ceramics (Silica, Glass, Quartz & Others), by Others (Wax, Laywood & Others), by Forms, by End-User Industries and by Region - Global Trends & Forecasts to 2019*. Dallas : TX.
- Martel, A. (2014). *Les matériaux d'impression 3D : un marché d'un milliard de dollars en 2019*. En ligne sur le site de 3D Natives <http://www.3dnatives.com/materiaux-impression-3d-2019/>, consulté le 29 avril 2015.
- Materialise. (2011). *i.materialise is proud to launch gold and silver*. En ligne sur le site iMaterialise <http://i.materialise.com/blog/entry/i-materialise-is-proud-to-launch-gold-and-silver>, consulté le 8 juin 2015.
- Materialise. 2014. *Mammoth Stereolithography*. En ligne <http://manufacturing.materialise.com/mammoth-stereolithography>, consulté le 13 juillet 2015.
- McGrath, M. (2015). *Stratasys tanking more than 30% on slashed guidance*. En ligne sur le site de Forbes <http://www.forbes.com/sites/maggiemcgrath/2015/02/03/stratasys-tanking-more-than-30-on-slashed-guidance/>, consulté le 7 juin 2015.
- Milkert, H. (2015). *3D print speeds to approach 1800 mm/sec, thanks to real's 3d printer boards*. En ligne <http://3dprint.com/63766/create-it-real-3d-rpt-fast/>, consulté le 10 juillet 2015.
- Miller, R. (2014). *Additive manufacturing (3D printing): Past, present and future*. *Industrial Heating*, 82(5), 39-40,42-43.

Molitch-Hou, M. (2013). *Is it 3D Printing? MIT Researchers Construct Building Blocks*. En ligne sur le site de 3D Printing Industry <http://3dprintingindustry.com/2013/08/26/is-it-3d-printing-mit-researchers-construct-building-blocks/>, consulté le 11 avril 2015.

Moreno, A. 2014. *Impression 3D : évolution ou révolution ?*. En ligne sur le site de Trends-Tendances <http://trends.levif.be/economie/high-tech/impression-3d-evolution-ou-revolution/article-normal-215717.html>, consulté le 13 juillet 2015.

Moskowitz, M., Beard, J. (2014). *Beyond 2014: evolving opportunities in technology*. Wells Fargo.

Moussion, A. sd. *Quels matériaux pour imprimer en 3D ?* En ligne <http://www.priximprimante3d.com/materiaux/>, consulté le 13 juillet 2015.

Murphy, S. V., & Atala, A. (2014). *3D bioprinting of tissues and organs*. Nature Biotechnology, 32(8), 773-785. doi:10.1038/nbt.2958

Naramore, C. (2012). *Could your 3D printer someday spy on you?* En ligne <http://www.3dprinter.net/steganography-could-your-3d-printer-spy-on-you>, consulté le 18/03/2015.

Nasa. (2013). *3D printing: food in space*. En ligne sur le site de la Nasa http://www.nasa.gov/directorates/spacetech/home/feature_3d_food_prt.htm, consulté le 6 avril 2015.

North Carolina Central University. (2015). *NCCU opens fabrication laboratory*. En ligne sur le site de l'université <http://www.nccu.edu/news/index.cfm?ID=9C1682B1-15C5-F8D8-3AED6716F8C631B3>, consulté le 7 juin 2015.

Osterman, P. (2000). *Work reorganization in an era of restructuring: Trends in diffusion and effects on employee welfare*. *Industrial & Labor Relations Review*, 53(2), 179-196.

Paque, B. & Coeurderoy, R. (2015). *Principes et définitions de l'innovation dans les entreprises*. Cours de Management stratégique de la technologie et de l'innovation. UCL.

Parker, N., Tan, E., Little, B. & Siseles, S. (2013). *Freelancer.com unveils the top 50 fastest growing online jobs for Q2 2013*. En ligne https://docs.google.com/document/d/1_PQ7K0jd8qLKMC_j-CLdpekkr2RzLBVi-F24roLcr2k/pub, consulté le 14 juillet.

Performance. (sd). *Project overview*. En ligne <http://www.performance-fp7.eu/project-overview/>, consulté le 24 juillet 2015.

Perkins, B., Lee, P. & Fenech, C (2015). *The Deloitte consumer review : digital predictions 2015*. 18. London : Deloitte.

Pierce, J. E. & Schwarz, S. J. (2015). *IP strategies for the rise of 3d printing*. En ligne <https://www.venable.com/ip-strategies-for-the-rise-of-3d-printing-04-14->

[2015/?utm_source=Mondaq&utm_medium=syndication&utm_campaign=View-Original](#), consulté le 23 juillet 2015.

Proto-pasta. (sd). *Exotic filament*. En ligne sur le site du fabricant <http://www.proto-pasta.com/>, consulté le 17 février.

PRWeb. (2013). *World's first 3D printed metal gun manufactured by Solid Concepts*. En ligne <http://www.prweb.com/releases/2013/11/prweb11311332.htm>, consulté le 17 avril 2014.

Rieland, R. (2014). *Forget the 3D printer: 4D printing could change everything*. En ligne sur le site du Smithsonian <http://www.smithsonianmag.com/innovation/Objects-That-Change-Shape-On-Their-Own-180951449/?no-ist>, consulté le 23 juillet 2015.

Rivera, J. (2013). *Gartner reveals top predictions for it organizations and users for 2014 and beyond*. En ligne <http://www.gartner.com/newsroom/id/2603215>, consulté le 19 juillet 2015.

Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of Innovations* (5th ed.). New York: Free Press.

Rosenberg, N. (1972). *Factors affecting the diffusion of technology*. *Explorations in economic history*, 10(1), 3-33.

Sevenson, B. (2014). *Dimension polymers to crowdfund the first professionally engineered, recycled 3D printing filament*. En ligne <http://3dprint.com/25119/dimension-polymers-recycled-filament/>, consulté le 19 juillet 2015.

Smartech markets. (2013). *3D printing markets: hope, hype and strategies*. Charlottesville, VA.

Smith, M. (2014). *Technologies to sustain the Army of 2025 and beyond*. En ligne http://www.army.mil/article/132473/Technologies_to_sustain_the_Army_of_2025_and_beyond/, consulté le 15 avril 2015.

Snyder, B. (2015). *Here is Amazon's audacious plan to go way beyond drones*. En ligne sur le site de Fortune <http://fortune.com/2015/02/27/amazon-3d-printers/>, consulté le 13 juillet 2015.

Spiliopoulos, P. (2013). *Impression 3D – Une technologie qui change notre vie?* Derinews. p. 6-8. Citation de Abe Reichental, CEO de 3D Systems

Stockholm international peace research institute. (2012). *The 15 countries with the highest military expenditure in 2011*. Stockholm.

Terdiman, D. (2015). *3D printing in auto industry should quintuple to \$1.25B by 2019*. En ligne <http://venturebeat.com/2015/01/03/3d-printing-in-auto-industry-should-quintuple-to-1-25bn-by-2019/>, consulté le 19 mai 2015.

The 3D Printing Association. sd. *About us*. En ligne <https://www.the3dprintingassociation.com/about-us>, consulté le 15 juillet 2015.

- The Economist. 2011. *Print me a Stradivarius*. En ligne <http://www.economist.com/node/18114327>, consulté le 13 juillet 2015.
- Tranchard, S. & Rojas, V. (2015). *Manufacturing our 3D future*. En ligne sur le site Iso <http://www.iso.org/iso/news.htm?refid=Ref1956>, consulté le 18 juillet 2015.
- Treacy, M. (2013) *Filabot turns scrap plastic into filament for 3D printers*. En ligne <http://www.treehugger.com/gadgets/filabot-turns-scrap-plastic-filament-3d-printers.html>, consulté le 19 juillet 2015.
- Tribot, S. (2013). *Impression 4D : quand l'objet devient intelligent*. En ligne sur le site des techniques de l'ingénieur http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/materiaux-innovants-nano-thematique_6342/impression-4d-quand-l-objet-devient-intelligent-article_85729/, consulté le 7 avril 2015.
- Tribot, S. (2013). *Les imprimantes 3D au coeur des opérations militaires*. En ligne sur le site Techniques de l'ingénieur http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/les-imprimantes-3d-au-coeur-des-operations-militaires-article_85714/, consulté le 15 avril 2015.
- Tumbleston, J. R., Shirvanyants, D., Ermoshkin, N., Januszewicz, R., Johnson, A. R., Kelly, D., ... & Desimone, J. M. (2015). *Continuous liquid interface production of 3D objects*. *Science*, 347(6228), 1349-1352.
- University of Texas at Austin. (2012). *Selective laser sintering, birth of an industry*. En ligne sur le site de l'université. http://www.me.utexas.edu/news/2012/0712_sls_history.php, consultée le 21 avril 2014.
- Vernasco, L. (2015) *Miguel Valenzuela spills the batter on pancakebot's food printing technology*. En ligne sur le site 3D Printing Industry <http://3dprintingindustry.com/2015/03/23/miguel-valenzuela-spills-the-batter-on-pancakebots-food-printing-technology/>, consulté le 11 avril 2015.
- Wainwright, O. (2013). *4D-printing: from self-assembling chairs to cancer-fighting robots*. En ligne sur le site The Guardian <http://www.theguardian.com/artanddesign/architecture-design-blog/2013/apr/10/4d-printing-cancer-nano-robots>, consulté le 7 avril 2015.
- Wake Forest. (sd). *Using ink-jet technology to print organs and tissue*. En ligne sur le site de la faculté de médecine de Wake Forest <http://www.wakehealth.edu/Research/WFIRM/Our-Story/Inside-the-Lab/Bioprinting.htm>, consulté le 24 avril 2014.
- Winker, R. (2014). *The truth about speed*. Stratasys. Eden Prairies, MN.
- Witte, E., Joost, N., & Thimm, A. L. (1972). *Field research on complex decision-making processes-the phase theorem*. *International Studies of Management & Organization*, 2(2), 156-182.

Wize. (sd). *History of 3d printing*. En ligne <http://www.wize3d.com/history-of-3d-printing/>, consulté le 17 juillet 2014.

Wohlers associates. (2013). *Additive manufacturing and 3D printing: State of the industry*. p.14.

Wohlers Associates. (2015). *Rapid product development service providers*. En ligne <http://www.wohlersassociates.com/service-providers.html>, consulté le 18 juillet 2015.

Wood, L. & Baya, V. (2014). *The role materials play in powering the 3-D printing revolution. Technology Forecast: The future of 3-D printing*. Vol. 2. p2. PricewaterhouseCoopers.

Zenobia, B. A. (2008). *A grounded agent model of the consumer technology adoption process*. Portland State University.