

The background of the entire page is a blue-tinted photograph of a 3D printing process. A printer's extruder is positioned above a build platform, with a small, dark, textured object being printed. The scene is reflected on the glossy surface of the platform.

L'IMPRESSION 3D : DE L'ÉMERVEILLEMENT TECHNIQUE AUX ENJEUX ORGANISATIONNELS, ÉCONOMIQUES ET SOCIÉTAUX

**Guillaume Blum
Michel de Blois
Nadim Tadjine**

**École de design de l'Université Laval
2017**

L'IMPRESSION 3D : DE L'ÉMERVEILLEMENT TECHNIQUE AUX ENJEUX ORGANISATIONNELS, ÉCONOMIQUES ET SOCIÉTAUX

Guillaume Blum, Ph. D.

Centre interuniversitaire de recherche sur la science et la technologie

École de design, Université Laval

guillaume.blum@design.ulaval.ca

Michel de Blois, Ph. D.

École de design, Université Laval

michel.deblois@design.ulaval.ca

Nadim Tadjine, candidat au doctorat

École de design, Université Laval

nadim.tadjine@gmail.com

Sommaire exécutif	i
Executive summary	ii
Résumé	iii
Summary	vi
Remerciements	ix
Table des matières	x-xi
Table des figures	xii
Contenu	1-71
Bibliographie et annexe	75-86

Accès en ligne : <http://design.ulaval.ca/impression3d>

Crédit photographique page de garde : Wikimedia - Jonathan Juursema

ISBN 978-2-9816772-0-4

Mai 2017

Québec (Qc), Canada

Sommaire exécutif. L'impression 3D est remplie de promesses qu'elle ne saura tenir, mais également de transformations organisationnelles, économiques et sociales inattendues. Pour comprendre l'impression 3D, il faut l'étudier en lien avec son système technique numérique. Après un retour historique sur le développement des technologies d'impression 3D (partie 1), la partie 2 du rapport étudie les différentes technologies, matériaux, éléments de la chaîne numérique, en les détaillant et précisant leurs avantages, inconvénients et principaux secteurs d'applications. Dans la partie 3, les transformations organisationnelles sont présentées. On y traite de normalisation, de liens avec les formes d'organisation (collaboration, aplanissement des hiérarchies), de la diffusion de connaissances, de la transformation de la chaîne de production, de la conception à la production et au lien avec l'utilisateur. Ce qui permet la transformation des modèles d'affaires. La partie 4 fait un état des lieux économique de l'impression 3D, et examine les acteurs du secteur au Canada. On y traite également des modèles économiques liés à l'*open source*, et à la personnalisation de masse. Les impacts dans plusieurs secteurs d'activités économiques sont détaillés, notamment le secteur aéronautique, l'architecture et la construction, le design, l'art, la fabrication, le secteur médical et dentaire. La partie 5 traite des modifications liées à la société, notamment en matière de perspectives environnementales, d'apparition de nouveaux lieux sociaux tels les Fablab et *Makerspace*, et de nouvelles pratiques comme celles reliées à l'*open source*, les impacts sur la santé, et sur la pédagogie. À partir de cette étude, nous formulons plusieurs messages clés :

1. La formation à l'impression 3D et aux conditions la favorisant est essentielle. Par conditions la favorisant, nous entendons l'apprentissage et la reconnaissance des compétences humaines, sociales et organisationnelles nécessaires et rendues possibles par cette dernière, notamment (mais pas uniquement) l'autonomie en milieu professionnel, une culture d'échange et de partage professionnel, la sensibilisation aux principes de l'innovation ouverte et de l'*open source*. Il est essentiel de comprendre les nouvelles dynamiques sociales, organisationnelles et économiques touchant à l'impression 3D et la chaîne numérique, car elles

sont à la base de l'économie du XXI^e siècle, reposant sur les savoirs. Il nous semble essentiel d'investir dans ces formations et dans une meilleure compréhension de ces dynamiques.

2. L'innovation sociale et technologique (du type Fablabs et Makers) joue un rôle clé. À la fois dans l'imaginaire, mais également dans des pratiques d'entraide et d'échange numériques invisibles. Ici, les impacts sont significatifs et importants. On peut y voir émerger des modèles d'éducation citoyenne touchants tant des individus (de tout âge), mais également des professionnels.

3. Favoriser le maillage économique des entreprises pour la création d'un écosystème dense de l'impression 3D s'avère essentiel dans le but de permettre le renouvellement du tissu industriel canadien. Il semble important d'inventorier et de développer un ensemble d'écosystèmes multidisciplinaires, réunissant des acteurs privés, des chercheurs et des représentants du gouvernement autour des enjeux sociaux, organisationnels et économiques liés à l'impression 3D.

4. Assurer le suivi et l'accompagnement des entreprises – notamment les PME – pour les supporter dans la transition vers l'impression 3D et la chaîne numérique. Une politique fiscale favorisant l'investissement privé dans les infrastructures numériques de demain pourrait également être envisagée.

5. Concevoir un outil d'évaluation du degré de conscientisation des connaissances pour les organisations. Ces dernières ont besoin d'information sur les impacts potentiels de ces nouvelles technologies, tant au niveau du potentiel de la technologie comme telle, mais surtout sur les impacts de ces technologies sur les dimensions organisationnelles, économiques et sociales. À cet effet, il est fortement suggéré de réfléchir au développement d'un outil de diagnostic, lequel permettrait d'explorer et de valider le degré de conscientisation des organisations aux enjeux reliés à l'avènement de ces technologies.

6. Améliorer les connaissances portant sur les avantages et les risques pour la santé, pour l'environnement et sur les enjeux éthiques reliés spécifiquement à l'impression 3D.

Executive summary. 3D printing may make unachievable promises, but allows unexpected organizational, economic and social transformations. The understanding of 3D printing is linked to the study of the technical digital system. The first part of the report historically reviews the development of 3D printing technologies (part 1). The second part studies the different kinds of technologies, their pros and cons as well as their key areas of applications. The organizational transformations are presented, in the third part, through the standardization of the links between the different types of organizations (collaboration, level hierarchies), the dissemination of knowledge, the production line transformation from conception to production as well as its link to the user. Thus, this allows the transformation of business models. The fourth part of the report proposes a clearer picture of the 3D printing economics and investigates its Canadian stakeholders. Economic models associated with open source and mass customization concepts are also explored in this part of the report. The impacts of many areas of economic activities are detailed in aeronautics, architecture and construction, design, art, manufacturing, medical and dental sectors. The fifth part discusses social changes, namely regarding environmental perspectives, new social space appearances like Fab Labs and Makerspaces as well as emerging practices like the ones associated to open source or to health and educational impacts. This study will allow us to articulate a series of key messages:

1. 3D printing training and conditions favoring it are essential. What we mean by favorable conditions is the learning and the recognition of human, social and organizational skills needed and provided by 3D printing training, including but not limited to a professional autonomy, an exchanging and sharing culture in the professional environment as well as an awareness to open innovation and open source principles. A better understanding of new social, organizational and economic dynamics affecting the 3D printing and the digital chain is essential because they are at the core of the knowledge-based 21st-century economy. Therefore, we believe it is important to invest

in this kind of training and to have a better understanding of its dynamics.

2. Social and technological innovation (i.e. Fab Labs and Makers) play a key role. Simultaneously, in the imagination and the mutual aid practices as well as in the invisible digital exchanges. Herewith, the impacts are important and meaningful. Civic education models are emerging and reaching individuals (of all ages) and professionals alike.

3. To promote the economic network of businesses to create a dense 3D printing ecosystem is essential to renew the Canadian industrial fabric. The inventory and the development of a set of multidisciplinary ecosystems bringing together private stakeholders, researchers and government representatives around social, organizational and economic issues linked to 3D printing seem important.

4. To ensure the tracking and support of businesses – in particular, SMEs – to support their transition to 3D printing and the digital chain. A tax policy could also encourage private investments in tomorrow's digital infrastructures and should be considered.

5. To create an assessment tool to explore the level of knowledge awareness for organizations. These organizations need information on the potential impacts of these new technologies, on their technological potentials per se, but mainly on their technological impacts for organizational, economic and social dimensions. For this purpose, reflections on the development of a diagnostic tool are strongly advised - which could allow the exploration and validation of the organizations' knowledge awareness towards the advent of these technologies.

6. To improve specific knowledge of 3D printing towards health, environmental and ethical benefits and risks.

Résumé

Partie 1 et 2 - Impression 3D et techniques de production

- L'histoire de l'impression 3D remonte au début du XXe siècle, mais ce n'est qu'à partir des années 90 que les recherches se sont accélérées
- Parler d'impression 3D au singulier est trompeur devant les multiples technologies, matériaux, etc. A minima, il faut distinguer l'impression 3D de type personnel de l'impression 3D de type industriel. La première est économique, mais avec un niveau de qualité plus faible. Elle est utilisée également par des entreprises à des fins de prototypage, R&D, test, maquette, échange avec les clients, etc. ; la seconde peut être utilisée en production sur une vaste gamme de matériaux, avec d'excellents niveaux de finition, mais nécessite un investissement important. Elle est néanmoins accessible comme fournisseur à qui l'on envoie des fichiers numériques, que l'on récupère par la poste quelques jours plus tard. Dans le rapport, on traite des différentes technologies disponibles, de leurs avantages, inconvénients et de leurs principaux domaines d'applications.
- Malgré la limite quant aux matériaux utilisables, il y a une diversité de matériaux aux propriétés différentes utilisables : plastiques, métaux, matériaux composites, biomatériaux — sans considérer les recherches en cours sur de nouveaux matériaux.
- L'impression 3D repose sur trois éléments clés : la modélisation, l'optimisation et la numérisation. Les avancées dans chacun de ces domaines augmentent la portée et les impacts de l'impression 3D.
- L'impression 3D rend possibles de nouvelles esthétiques, et par là même, à la capacité de transformer la notion d'esthétique dans la société.

Partie 3 - Impression 3D et organisation

- Plusieurs groupes travaillent à la normalisation ISO de l'impression 3D afin de simplifier l'adoption par les organisations. Avec l'impression 3D, on passe de la consommation de masse à la personnalisation de masse à travers une transformation de la notion de normalisation.
- L'impression 3D favorise l'adoption de pratiques organisationnelles propres au numérique, telle une augmentation et simplification des collaborations, un aplanissement des structures organisationnelles, une meilleure diffusion des connaissances interorganisationnelles.
- L'impression 3D redéfinit la chaîne de production, en l'allégeant tant en amont (conception) qu'en aval (production, lien avec l'utilisateur). Elle contribue à la transformation des compétences des créateurs et des producteurs. Elle permet la multiplication des cycles de prototypage rapide, permettant de se centrer plus facilement sur les enjeux d'usages créateurs de sens et de valeur. En termes de

production, elle permet l'économie (nouvel usage) de matière, la suppression d'étapes devenues superflues résultant en gain de temps important, l'optimisation de formes, de poids, de taille et de performance des objets (hyper optimisation — géométrique, structurelle, formelle).

- De nouvelles chaînes d'approvisionnement sont alors possibles et s'organisent, permettant une reterritorialisation (possiblement en grappe et en réseau) de l'industrie, sous une forme beaucoup plus agile. On assiste ainsi à l'émergence de nouveaux modèles d'affaires embryonnaires.
- Les connaissances manquantes autour de l'impression 3D sont plutôt de nature socio-organisationnelles que techniques.

Partie 4 - Impression 3D et transformations économiques

- Au niveau économique, une présentation de montre que l'industrie de l'impression 3D est en forte croissance depuis quelques années et devrait se poursuivre pour les années à venir.
- Une présentation de quelques acteurs économiques clés de l'impression 3D est réalisée.
- Le lien entre modèles *open source* et impression 3D modifie le tissu industriel, avec notamment impact sur la question de la propriété intellectuelle.
- Cette reconfiguration économique liée à l'impression 3D a des impacts potentiels importants, telle une possible reterritorialisation s'accompagnant d'une reformulation de la dynamique industrielle, différente de la précédente révolution industrielle. Cette dynamique implique de nouveaux acteurs, de nouveaux modes d'échange, nécessitant un passage par la chaîne numérique. Cet ensemble de conditions émergentes et variées crée une nouvelle synergie entre les secteurs manufacturiers et le marché. Ce contexte unique permet de générer de nouvelles activités économiques à valeur ajoutée, suivant des cycles courts susceptibles de s'affranchir d'une partie des obstacles technologiques pour les producteurs. Par exemple, en design et en architecture, les imprimantes 3D (de type personnel) sont aujourd'hui massivement utilisées.
- L'impact de l'impression 3D est présent dans plusieurs secteurs d'activités économiques, notamment le secteur aéronautique, l'architecture et la construction, le design et la joaillerie, l'art, le secteur médical et dentaire. Ainsi, des impacts importants dans les domaines de la santé (prothèses, greffes, reconstruction de tissus humains, etc.) de l'aéronautique (nouvelles formes aérodynamiques, objets plus légers, etc.) redéfinissent les acteurs et les compétences à développer dans ces secteurs de l'économie.

Partie 5- Impression 3D : perspectives environnementales et transformations sociétales

- D'un point de vue environnemental, l'impression 3D a un impact sur le cycle de vie des matériaux et des produits (utilisation des matières premières nécessaires sans surplus, diminution du poids, transport plus local en cas de reterritorialisation, épuration des matériaux, impact sur le cycle de vie), mais les études ne sont pas unanimes quant aux avantages environnementaux.
- Les FabLabs traduisent une dynamique collaborative basée sur une culture d'entraide des acteurs. On note une nouvelle économie des modèles numériques reposant sur une logique proche de celle de l'open source (par exemple, partage des fichiers numériques dans des bibliothèques en ligne). Ces espaces permettent la co-conception et l'apprentissage —des technologies et des processus de conception.
- L'évolution rapide de l'impression 3D pose des questions quant à son enseignement et aux nouvelles possibilités offertes (emplois, débouchés, marchés, modèles d'affaires). Notamment, elle suppose, plus que d'apprendre sur les compétences techniques liées à l'impression 3D, mais d'apprendre les pratiques et usages collaboratifs qui permettent sa diffusion au sein d'organisations.
- Des questions demeurent en matière de santé (inhalation de produits toxiques, matériaux plastiques, expositions prolongées, etc.) et en matière éthique (fabrication d'armes à feu à domicile, clés de bagage universelles).

Abstract

Part 1 & 2

- 3D printing history goes back to the beginning of the 20th century, yet researches only accelerated during the 1990s.
- Discussing 3D printing in a singular manner is misleading in view of the multiple available technologies, materials, etc. At least, the distinction between personal 3D printing and industrial 3D printing is necessary. The first is cheaper but of lower quality. Furthermore, businesses also use it for prototyping, R&D, testing, modeling, client exchange, etc. The second can be used for production on a wide range of materials and with excellent finishes but requires significant investment. Otherwise, it is accessible through a supplier to whom we send digital files that we can recover a few days later by mail. In the report, we explore the different kinds of available technologies, their strengths and weaknesses as well as their main application areas.
- Despite the limited use of materials, a diversity of material with different qualities are useable: plastics, metals, composite materials, biomaterials – not to mention ongoing research for new materials.
- 3D printing is based on three key components: modeling, optimization and digitalization. The advances in each of these fields increase the scope and their impacts on 3D printing.

3D printing enables new aesthetics and even the capacity to transform the aesthetic notion in society.

Part 3

- For the purpose of simplifying the adoption of 3D printing by organizations, several groups are working on an ISO standardization. 3D printing allows the passage from mass consumption to mass personalization through the transformation of the standardization notion.
- 3D printing enables the adoption of specific, digital, organizational practices such as simplified and increased collaborations, organizational structures leveling as well as a better dissemination of cross-organizational knowledge.
- 3D printing redefines the production chain by alleviating it both upstream (conception) and downstream (production, user link); it contributes to the skills transformation of creators and producers. It allows the multiplication of rapid prototyping cycles making it easier to concentrate on the creation of meaningful and valuable uses. In terms of production, it provides saving on materials (new uses), suppression of rendered superfluous steps resulting in considerable time saving, optimization of forms, weight and size as well as objects performance (extreme optimization – geometrical, structural, formal).
- New supply chains are now possible and their organization is allowing a reterritorialization of industry (possibly in clusters and networks) in

a more agile form. Thus, we can witness the emergence of embryonic business models.

- Missing knowledge about 3D printing is rather socio-organizational than technical.

Part 4

- From an economic point of view, the presentation of 3D printing business is completed. For some time now, the 3D printing industry has been growing rapidly and is expected to continue in the years to come.
- A presentation of some economic actors is achieved.
- The link between open source and 3D printing is changing the industrial fabric; there are impacts particularly on intellectual propriety issues.
- This economic reconfiguration associated with 3D printing is potentially creating important impacts such as possible reterritorialization along with the reformulation of the industrial dynamics, unlike the previous industrial revolution. New players, new trading modes are involved in this kind of dynamic and requires a passage through the digital chain. This set of varied and emerging conditions creates a new synergy between the manufacturing sector and the market. This unique context enables the generation of new value-added economic activities following short cycles capable of freeing itself from part of the technological barriers that producers encounter. For example, in design and architecture, (personal) 3D printers are now used on a massive scale.
- The 3D printing impacts are present in several economic activity sectors, particularly aeronautics, architecture and construction, design and jewellery, art, medical and dental sectors. Thus, important impacts in healthcare (prostheses, transplants, reconstruction of human tissues, etc.) and aeronautics (new aerodynamic shapes, lighter objects, etc.) are redefining the players and the skills to master in these economic sectors.

Part 5

- In an environmental perspective, 3D printing has an impact on the lifecycle of products and materials (minimal raw material use, reduce weight, local transportation in reterritorialization cases, material cleansing, lifecycle impact). However, studies are not unanimous on its environmental benefits.
- The Fab Labs reflect a collaborative dynamic between the various players involved based on a culture of mutual aid. A new economy of digital models is being noticed, based on a logic close to open source (i.e. digital files shared on electronic libraries). These spaces enable the co-design and the learning – of technologies and design processes.
- The rapid 3D printing evolution raises questions as to its teaching and the new possibilities it offers (employment, opportunities, markets, business models). Herewith, learning the uses and collaborative practices allowing its diffusion within organizations are more important than learning 3D printing skills.
- Questions towards health concerns (inhalation of toxic fumes, plastic materials, prolonged exposures, etc.) and ethics (homemade firearms, general baggage keys) are still standing.

Remerciements

Ce rapport n'aurait pas été possible sans la contribution de plusieurs personnes et organismes, au premier rang duquel le conseil de recherche en sciences humaines du Canada (CRSH) qui a financé la recherche. Merci à Roxanne Dompierre et Laura Kastronic du CRSH qui ont su se montrer flexibles, notamment suite au congé paternité pris par l'un des auteurs du rapport.

En second lieu, nous tenons à remercier les étudiants ayant contribué à la recherche : Valérie Laliberté, Elizabeth Coulombe, Benjamin Pal, Roxanne Hurtubise, Sergio Da Silva et Souha Bradai, Valérie Côté. Merci également à la cohorte d'étudiants du baccalauréat en design de produits graduant en 2017 pour leur participation à l'élaboration du wiki impression3d.education.

Merci également à nos collègues Christophe Desmeules-Robillard et Lola Duprat pour leurs relectures assidues. Notre bibliothécaire Marianne Demers-Desmarais pour son aide dans la recherche bibliographique.

Nous remercions participants, professionnels et chercheurs rencontrés, incluant les participants du colloque que nous avons organisé lors du congrès de l'ACFAS : François Brument, Benoît Balmana du Réseau Québec 3D, Benoît Leduc d'Innovation, Sciences et Développement économique Canada, Denis Laurendeau, Alexandre Bois-Brochu, Arnaud Seigne, Jean-Philippe Carmona, Céline Lafontaine, Elisabeth Abergel, Gilles Boenisch, Thierry Daunois, Constance Garnier, Emmanuel Bonnet, Fabrice Cailloux, Valérie Lehmann, Marc-André Léger, Nabyl Merbouh, Geoffroi Garon-épaule, Gabriel Doré, Isabelle Urseau, Alexandre Joyce, Jean-Thomas Valentin, Jean-Marc Charlot, Kim B. Deland, Artur Alvès. Ainsi que nos collègues Claudia Déméné et Caroline Gagnon.

Enfin, merci au personnel de l'Université Laval qui par leur soutien visible ou invisible, notamment dans les rouages administratifs, ont contribué au bon déroulement de la recherche : Isabelle Brière, Annie Rioux, Ariane Couture, et notre directeur Michel Fleury.

Table des matières

Introduction	1
Partie 1. Historique de l'impression 3D	3
1.1 Émergence de l'impression 3D	4
1.2 L'impression 3D au 21 ^e siècle	4
1.3 Les dates clés de l'impression 3D	5
Partie 2. Impression 3D et techniques de production	7
2.1 Techniques d'impression	8
2.1.1 Impression à base de thermoplastiques et de composites	9
a) <i>Extrusion de matière ou Fused Deposition Modeling</i>	9
b) <i>Le frittage laser – SLS</i>	10
2.1.2 Impression de matériaux à base de résine	11
a) <i>La stéréolithographie (SLA)</i>	11
b) <i>Projection de matière ou Material Jetting</i>	12
2.1.3 Impressions à base de métaux	12
a) <i>Le frittage laser de Métal ou Direct Metal Laser Sintering (DMLS)</i>	12
b) <i>La Fusion par Faisceau d'Electrons ou Electron Beam Melting (EBM)</i>	13
2.1.4 Impression 3D en couleur	14
a) <i>Le procédé de Projection de Liant ou Binder Jetting</i>	14
b) <i>Le Laminage par Dépôt Sélectif ou Sheet Lamination</i>	14
2.2 Matériaux d'impression	15
2.2.1 Les polymères	15
a) <i>Les thermoplastiques : ABS et PLA</i>	15
b) <i>Polyamides et Résines</i>	16
2.2.2 Les matériaux composites	16
a) <i>L'alumide</i>	17
2.2.3 Métaux	17
2.2.4 Autres matériaux et opportunités et limites	18
2.3 Procédés et techniques d'impression 3D	19
2.3.1 Modélisation et Numérisation	19
2.3.2 Optimisation	21
2.4 Impression 3D, <i>open source</i> et techniques de production	21
2.5 Design et esthétique nouvelle	22
2.6 Défis technologiques et limites	23
Partie 3. Impression 3D et organisation	27
3.1 Adoption de la fabrication additive dans les organisations	28
3.1.1 La normalisation de la fabrication 3D	28
3.2 Nouvelles formes organisationnelles induites par la fabrication additive	29
3.2.1 Collaboration	29
3.2.2 Approche horizontale (relation hiérarchique aplanie)	30
3.2.3 Diffusion de connaissances interorganisationnelles	31
3.3 Transformation de la chaîne de production	32
3.3.1 En amont : la conception	32

a) <i>Cohabitation numérique/physique permise par l'impression 3D</i>	32
b) <i>Prototypage rapide et cycle d'innovation</i>	33
c) <i>Objets-frontières : Approche par l'expérience et le sens</i>	34
3.3.2 En aval : la production	35
a) <i>Transformation de la chaîne de production</i>	35
b) <i>Rapidité de la chaîne de production</i>	37
c) <i>Proximité de la production</i>	38
d) <i>Obsolescence des produits</i>	38
3.4 Transformation des modèles d'affaires	39
3.5 Défis et limites	39
 <u>Partie 4. Impression 3D et transformations économiques</u>	 43
4.1 État des lieux économique de l'impression 3D	44
4.2 Acteurs économiques au Canada	46
4.3 Modèles économiques et <i>open source</i>	47
4.3.1 Un exemple : DIY drones and <i>open source</i>	49
4.4 Impression 3D et personnalisation de masse	50
4.5 Distribution géographique des emplois et reterritorialisation	51
4.6 Impacts selon les secteurs d'activités économiques	51
4.6.1 Aéronautique & aérospatial	51
4.6.2 Architecture & construction	52
4.6.3 Design et joaillerie	53
4.6.4 Art	54
4.6.5. Secteur médical et dentaire	56
4.7 Défis et limites	57
 <u>Partie 5. Impression 3D : perspectives environnementales et transformations sociétales</u>	 61
5.1 Perspectives environnementales	62
5.1.1 Design optimisé, léger et épuré	62
5.1.2 Conception verte et cycle de vie	63
5.1.3 Changement des systèmes de valeur	64
5.2 FabLab et collaboration	64
5.3 Transformations sociales liées à l' <i>open source</i>	65
5.4 Impression 3D : Une nouvelle approche de la santé	67
5.5 Processus d'impression 3D et pédagogie	68
 <u>Conclusion</u>	 71
 <u>Bibliographie</u>	 75
 <u>Annexe</u>	 83

Table des figures :

- Figure 1 : Définition des 7 grandes familles de procédés de fabrication
- Figure 2 : Représentation du procédé de stéréolithographie
- Figure 3 : Frittage laser de Métal ou DMLS
- Figure 4 : Illustration du procédé de laminage par dépôt sélectif
- Figure 5 : Imprimante ayant recours à des biomatériaux pour recréer des tissus humains
- Figure 6 : Tableau comparatif des principaux modeleurs existants sur le marché
- Figure 7 : Pièce modélisée en 3D, avant et après optimisation topologique
- Figure 8 : Collaboration et chaîne de valeur de l'impression 3D
- Figure 9 : L'innovation ouverte présentée pour les industries de R&D
- Figure 10 : Comparaison des chaînes de production utilisant la fabrication traditionnelle et additive
- Figure 11 : Modélisations simplifiées d'une chaîne de production traditionnelle et d'une chaîne de production basée sur l'impression 3D
- Figure 12 : Représentation des ventes de l'industrie de la fabrication additive entre 1988 et 2015 dans le monde
- Figure 13 : Part de marché des plus grandes entreprises de fabrication additive dans le monde
- Figure 14 : Représentation des entreprises de fabrication additive au Québec en fonction de leur taille et de leur domaine d'intervention
- Figure 15 : Nano Racer et sa partie centrale imprimée en 3D
- Figure 16 : Composant aérospatial complexe imprimé sur sa face interne et externe grâce à la fabrication additive
- Figure 17 : Premier pont piétonnier imprimé en 3D à Madrid par Enrico Dini
- Figure 18 : Tabouret et Chaise SOLID désigné par P.Jouin en 2004
- Figure 19 : Material Speculation- Lamassu : figurine détruite par ISIS en Irak
- Figure 20 : Reproduction en 3D pour les malvoyants de la peinture de Renoir : Femme avec parasol dans un jardin, de 1875 – Musée Thyssen-Bornemisza – Madrid
- Figure 21 : Prothèse auditive imprimée à base de cellules souches de cartilage par l'équipe du Pr. Woodruff
- Figure 22 : Cellules photovoltaïques flexibles
- Figure 23 : Liberator : Pistolet imprimé en 3D utilisant des balles réelles
- Figure 24 : Prothèse de main imprimée en 3D

Introduction

Depuis plusieurs années, la question de l'impression 3D est reprise dans les médias et les réseaux sociaux où nombre de vidéos sur des technologies « révolutionnaires » circulent. Mais du rêve de l'impression 3D transformant la réalité à la réalité elle-même, on observe un écart important. L'impression 3D nécessite la maîtrise d'une vaste chaîne, allant du logiciel de modélisation et des techniques associées, à la connaissance de l'imprimante, des points de fusion des matériaux utilisés, etc. Ainsi, si la technique est disponible pour l'amateur, elle nécessite une compréhension poussée et des connaissances tacites apprises par l'expérience ou par le partage (Nonaka et Takeuchi, 1997). Est-ce à dire que l'impression 3D ne relève que d'une technologie banale ? Probablement pas, car s'il faut abandonner le fantasme de l'impression 3D révolutionnant la production et la consommation, elle a le potentiel de transformer de manière importante notre environnement industriel, économique, scientifique, social et sociétal (Rosenberg et al., 2015).

À l'ère de la troisième révolution industrielle, l'impression 3D traverse de nombreux enjeux de société, investissant nos modes de consommation et de production. Entre mondes numérique et physique, elle se répercute à toutes les échelles : celle domestique du consommateur individuel, celle, collective, des *makers* ou « fabricateurs numériques », mais aussi celle industrielle, dans de nombreux domaines tels que le médical, l'aéronautique ou encore le spatial.

Or, si le champ de l'impression 3D est en pleine expansion, les travaux sur ses implications socio-économiques sont moins présents, à la faveur de travaux d'ingénierie. Ces derniers sont indispensables pour l'avancement des savoirs sur les imprimantes 3D elles-mêmes et pour l'amélioration des techniques de fabrication, mais l'usage de ces imprimantes est encore trop peu étudié. Or, toute technologie a un impact sociétal et politique (Winner, 1980) et possède les germes de transformation de son environnement (Simondon, 1969). Ainsi, la synthèse du phénomène technique - l'impression 3D - par les connaissances issues des sciences sociales (sciences du design, communication, sciences de l'organisation, anthropologie, sociologie, etc.) était plus que nécessaire. C'est là l'objet de ce rapport. Celui-ci établit des liens entre ces recherches, afin d'intégrer ces différents savoirs pour arriver à un dialogue transdisciplinaire sur la question de l'impression 3D plutôt qu'à un empilement de recherches éparses.

L'**objectif général** de cette synthèse de connaissances est de permettre une meilleure compréhension des enjeux économiques et sociétaux liés à la technologie de l'impression 3D et leur prise en compte par ses différents acteurs. Nous espérons que les chercheurs, les professionnels, les étudiants et les curieux néophytes, provenant de disciplines, métiers et parcours divers y trouveront tous leur compte, dans cette vue d'ensemble.

À partir des travaux de recherches et des savoirs développés au Canada comme à l'international en sciences humaines sur les implications et les transformations apportées par cette technologie, nous établissons une telle synthèse arrivant en conclusion à un ensemble de propositions, pour 1) mettre en lumière les particularités et les forces du Canada et d'identifier

les lacunes en matière d'impression 3D ; 2) proposer des pistes de recherche et d'action à mettre en œuvre par la triple hélice de l'innovation que constituent l'industrie, les universités et le gouvernement (Leydesdorff et Etzkowitz, 1998).

Afin de répondre à cet objectif général, le rapport est structuré en cinq parties. Après un rappel historique de l'impression 3D qui permet une mise en contexte de la recherche, quatre sous-thématiques sont abordées. La deuxième partie vise à identifier et décrire les éléments importants reliés aux technologies additives. La troisième partie identifie et décrit les transformations organisationnelles reliées à l'impression 3D. Les quatrième et cinquième parties traitent respectivement des dimensions économiques et des dimensions sociétales associées à l'impression 3D.

Vocabulaire et définition

Si c'est le terme d'impression 3D qui est le plus couramment utilisé aujourd'hui, notamment auprès des médias, comités d'investisseurs et autres groupes, on retrouve dans le monde scientifique et technique les termes d'« *additive manufacturing* » ou de « fabrication additive ». Ainsi, le 26 mars 2016, le terme de « fabrication additive » a été référencé 767 000 fois sur Google. Le terme « d'impression 3D » a produit 49,6 millions de résultats, tandis que la variation « d'impression 3-D » en produisait 179 millions (Wohlers, 2016). Dans ce rapport, ces deux termes seront utilisés sans distinction particulière.

La **fabrication additive** ou **impression 3D** peut être considérée comme une méthode de conception et fabrication assistée par ordinateur (CFAO) définie par les organismes de normalisation nationaux ou internationaux comme étant le procédé de mise en forme d'une pièce par ajout de matière par empilement de couches successives, contrairement par exemple au décolletage ou au fraisage, qui agissent par enlèvement de matière (fabrication soustractive).

Méthode

La recherche menant à la publication de ce rapport consiste en une revue de la littérature existante. Dans un premier temps, une recherche sur plusieurs bases de données reliées aux sciences humaines et sociales a été effectuée. Dans les titres, résumés et mots clés, les termes suivants ont été recherchés : "3D printing" ; "three dimensional printing" ; "3 dimensional printing" ; "additive manufacturing" ; "additive technologies" ; "additive fabrication" ; "layered manufacturing" ; "technologies additives" ; "fabrication additive" ; "fabrication par couches" ; "impression 3D" ; "impression tridimensionnelle" ; "impression en trois dimensions". Le résultat est un corpus de 4002 références, à partir desquels une sélection manuelle par les chercheurs a été effectuée sur la base des titres et résumés pour sélectionner les articles et ouvrages les plus porteurs. Les articles techniques portant sur le développement de nouveaux procédés, matériaux, etc. constituant la grande majorité du corpus, ont été, la plupart du temps, écartés. Par ailleurs, d'autres travaux non référencés dans ces bases de données ont également été intégrés. Notamment ceux reliés à l'organisation d'un colloque en 2016 portant sur les dimensions sociales reliées à l'impression 3D.

Historique de l'impression 3D

Partie 1. Historique de l'impression 3D

1.1 Émergence de l'impression 3D

Afin de mieux situer l'impression 3D et les innovations permises par l'avancement technologique et l'avènement du numérique, il était nécessaire de proposer un rappel historique afin de retracer l'évolution des recherches et procédés de fabrication additive du 20^e siècle à aujourd'hui.

C'est en déposant en 1903 un brevet intitulé « *Method of composition horseshoes* » que l'américain G.J Peacock pose sans le savoir, les fondements de la fabrication additive. Il y décrit la fabrication d'un fer à cheval par empilement de couches de tissus. Ce n'est qu'un demi-siècle plus tard que les premières recherches sur les résines photopolymérisables voient le jour, avec les travaux de Wyn Kelly Swainson qui dépose en 1968 un brevet intitulé « *Method of producing a 3D figure by holography* » dans lequel il décrit le durcissement d'une résine liquide sous l'action de deux lasers.

La communauté de l'impression 3D attribue la paternité de l'impression 3D à Charles Hull, aujourd'hui vice-président de 3D Systems, qui, en août 1984, dépose un brevet intitulé « *Apparatus for production of three-dimensional by stereolithography* », dans lequel il développe le principe de la stéréolithographie, dont la première machine industrielle (SLA-1) sera commercialisée en 1987. Ce n'est que peu de temps après en 1989 que l'entreprise Stratasys dépose le premier brevet du FDM (*fused depositing modeling*), qui est aujourd'hui l'une des techniques d'impression les plus répandues, et commercialise en 1992 la première machine commerciale appelée le *3-D modeler*.

Nous sommes alors au début des années 90 et le prototypage rapide (cf. la section 3.3.1.b) devient une réalité commerciale et industrielle favorisée par l'usage des approches agiles et méthodes de conception traditionnelles en design, avec notamment l'utilisation de la fabrication additive dans la réalisation de moules. Beaucoup de travaux visant à améliorer et développer la technologie, permettant de passer en 1993 des premiers travaux du MIT sur l'impression 3D à l'implantation d'une vessie artificielle (*Wake forest institute for regenerative medicine*) sur un patient en 1999.

La fabrication additive sert alors aux industriels à créer des objets pour tester rapidement leur design - prototypage rapide - avant de décider la production de pièces en série, via des méthodes de production plus conventionnelles.

1.2 L'impression 3D au 21^e siècle

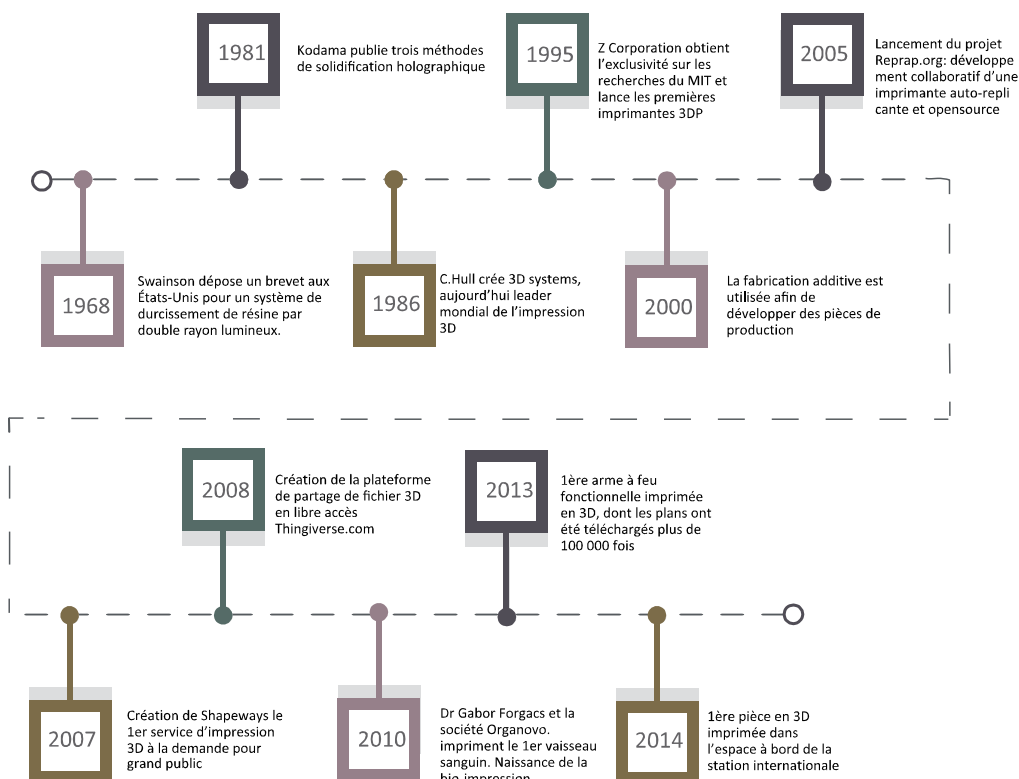
L'entrée dans le nouveau millénaire marque un véritable tournant dans l'impression 3D, que ce soit sur le plan technologique, organisationnel, économique ou encore sociétal, comme le présent rapport aura l'occasion de le préciser. Si le 20^e siècle était placé sous le signe des révolutions technologiques associées à l'impression 3D, le 21^e siècle quant à lui, place

la fabrication additive dans un système plus complexe. Les avancées technologiques permettent ainsi aux entreprises de repenser leurs modèles de développement et de production, aux sociétés et aux *makers* de développer de nouvelles communautés, via notamment, la naissance des Fablabs (cf. la section 5.2).

Ce début de 21^e siècle est également le signe d'un véritable engouement économique et financier vis-à-vis de l'industrie de l'impression 3D, symbole de la révolution industrielle en cours. Il est néanmoins probable que la technologie suive le *hype cycle* (Linden et Fenn, 2003), c'est-à-dire qu'elle passe de ce moment d'engouement à une forme de « désillusion », reliée notamment à la prise de conscience que toutes les promesses miroitées n'avaient pas de réels fondements. Puis, la technologie remontera petit à petit en puissance pour atteindre son potentiel, discuté dans la suite de ce rapport. Selon le rapport Gartner de 2015 sur les *hype cycles*, l'impression 3D personnelle est au bord de ce pic de désillusion, là où l'impression 3D professionnelle est en passe d'atteindre d'ici quelques années son plateau de productivité.

Même si l'impression 3D ne remplace la production traditionnelle de pièces en série, qui reste plus intéressante en termes de coût, elle permet à de nombreuses entreprises et *startup* de reconsidérer leur place sur le marché, en leur permettant de diversifier leur production.

1.3 Les dates clés de l'impression



Résumé

- L'histoire de l'impression 3D remonte au début du XXe siècle, mais ce n'est qu'à partir des années 90 que les recherches se sont accélérées

Abstract

- 3D printing history goes back to the beginning of the 20th century, yet researches only accelerated during the 1990s.

Impression 3D et techniques de production

Partie 2. Impression 3D et techniques de production

Dans cette partie, on traite des techniques d'impression 3D, des matériaux utilisés, du procédé d'impression 3D, des liens avec l'*open source*, des nouvelles formes et esthétiques possibles et finalement des défis technologiques et de ses limites.

2.1 Techniques d'impression

D'après l'organisation internationale de normalisation ISO, la fabrication additive est une technologie polyvalente qui peut être mise à profit lors de chacune des phases de conception et de développement d'un produit. Les procédés de fabrication additive peuvent être utilisés pour fabriquer des modèles d'étude, des prototypes, de l'outillage et pièces pleinement fonctionnelles pour leur utilisation finale.

La norme ISO 17296-2:2015 décrit les éléments fondamentaux régissant la fabrication additive. Elle définit ainsi les 7 grandes familles de procédés de fabrication additive (Figure 1), lesquelles ne sont pas et ne peuvent pas être exhaustives compte tenu du développement de nouvelles technologies et de l'évolution rapide du secteur.

Types de procédés	Section
Extrusion de matière ou <i>Fused Deposition Modeling (FDM® ou FFF)</i> : procédé de fabrication additive dans lequel le matériau est distribué de manière sélective par une buse, un jet ou à travers un orifice.	2.1.1.a
Frittage Laser ou <i>DMLS</i> et <i>SLS</i> : procédé de fabrication additive dans lequel l'énergie thermique fait fondre de manière sélective certaines zones d'un lit de poudre ou de métal.	2.1.1.b 2.1.3.a
Stéréolithographie ou <i>Vat photopolymerization (SLA)</i> : procédé de fabrication additive dans lequel un photopolymère liquide plongé dans une cuve est durci de manière sélective par polymérisation activée par la lumière.	2.1.2.a
Projection de matière ou <i>Material jetting</i> : procédé de fabrication additive dans lequel des gouttelettes du matériau fabriqué sont déposées de manière sélective.	2.1.2.b
Fusion par faisceau d'électrons ou <i>Electron Beam Melting</i> : procédé de fabrication additive dans lequel l'énergie thermique focalisée sert à faire fondre les matériaux au fur et à mesure qu'ils se déposent.	2.1.3.b
Projection de liant ou <i>Binder jetting</i> : procédé de fabrication additive dans lequel un agent de liaison liquide est déposé de manière sélective pour lier/agglutiner des matériaux en poudre.	2.1.4.a
Laminage par dépôt sélectif ou <i>Sheet lamination</i> : procédé de fabrication additive dans lequel des couches de matériau sont liées entre elles pour former un objet.	2.1.4.b

Figure 1 : Définition des 7 grandes familles de procédés de fabrication additive (norme ISO 17296-2:2015)

Parmi ces 7 grandes familles de procédés de fabrication, la stéréolithographie, l'extrusion de matière et les procédés de liage de poudre sont les plus répandus. Il faut noter que malgré des machines, des

coûts et des apports qui diffèrent, ces procédés sont répandus auprès des particuliers et des industriels.

2.1.1 Impression à base de thermoplastiques et de composites

a) Extrusion de matière ou Fused Deposition Modeling

Le procédé FDM (*Fused Deposition Modeling*), aussi connu sous le nom d'extrusion¹ de matière, *Fused Filament Fabrication* ou *Plastic Jet Printing*, a été développé par la société Stratasys à la fin des années 1980 et commercialisé pour la première fois en 1991. Il est le plus ancien procédé après la stéréolithographie, et a été popularisé par l'arrivée des imprimantes personnelles comme le projet RepRap (cf. section 2.4) ou encore les imprimantes MakerBot. Elle est en grande partie à l'origine de la popularité de l'impression 3D.

Contrairement aux autres procédés de fabrication additive, les systèmes d'extrusion sont peu coûteux (quelques dollars pour produire une pièce d'échec) et relativement faciles à utiliser, ce qui justifie en partie leur succès auprès des particuliers, mais aussi des petites entreprises. Ils représentent aujourd'hui le type de machine le plus répandu dans le monde de l'impression 3D grand public.

La plupart des systèmes d'extrusion sont équipés d'une seule tête, mais des machines avec deux ou trois extrudeuses sont aussi disponibles.

L'impression 3D démarre par le préchauffage de la tête d'extrusion (autour de 200°C), nécessaire pour permettre à la matière de passer d'un état solide à un état malléable (température de mise en forme). Une fois la machine chauffée, un fil de matière, de l'ordre de 1,75 à 3 millimètres de diamètre, est alors extrudé sur une plateforme à travers une buse se déplaçant sur deux ou trois axes dépendamment du plateau qui soit fixe ou mobile. Sur certains modèles, la plateforme peut elle aussi être mobile sur le plan horizontal. Celle-ci descend d'un niveau à chaque nouvelle couche appliquée, jusqu'à la fin de l'impression de l'objet.

Afin d'éviter la déformation de certaines sections de pièces en porte à faux, des supports imprimés à même la pièce maintiennent cette dernière pendant l'impression. D'ordre général, les supports sont requis lorsqu'il y a un angle négatif supérieur à 30 degrés. Ces supports sont enlevés manuellement (par découpage ou brossage) ou chimiquement (par dissolution) dans une phase de finition lorsque l'objet est complété (phase de post impression).

Auparavant principalement limitée à quelques polymères thermoplastiques, cette technologie est aujourd'hui compatible avec un large choix de matériaux composites, notamment des filaments composés d'un mélange de polymère à 60% et de bois (*LayWood*), de pierre (composite de pierre et de polyester : *LayBrick*), ou encore de céramique. Il est également possible d'imprimer des matières alimentaires, en faisant des adaptations au niveau de la tête d'extrusion.

¹ L'extrusion est un « procédé de mise en forme par lequel une matière fusible est poussée à chaud dans une filière » (définition issue d'Antidote).

Aussi utile au prototypage rapide qu'au maquettage (cf. la section 3.3.1.b), et malgré un temps de fabrication très lent, l'extrusion est répandue dans de nombreux domaines, allant de l'architecture à l'électronique en passant par la cuisine ou encore le textile.

À noter que le terme *Fused Deposition Modeling* et son abréviation *FDM* sont des marques déposées de l'entreprise Stratasys. L'équipe RepRap utilise donc le terme *Fused Filament Fabrication (FFF)* qui est sous licence GPL (licence publique générale GNU).

- Avantages : résistance des pièces, prix peu élevé et choix des matériaux (thermoplastiques, verre, chocolat, etc.), souvent recyclables.
- Inconvénients : comportement anisotrope (les propriétés diffèrent en fonction de la direction considérée), qualité de l'impression et temps de fabrication important, technologie difficile à maîtriser, petits volumes d'impression.
- Applications : prototypes, objets personnels, maquettes.

b) Le frittage laser - SLS

Le frittage laser est une technique de fabrication additive consistant à chauffer de fines particules de plastique, métal, céramique ou de poudre de verre à l'aide d'un laser.

Il existe deux technologies dans les procédés de frittage laser, soit la SLS (*Selective Laser Sintering*) et la DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*).

Le procédé de la SLS utilise la poudre de polymère comme matériau principal de construction, tel que du nylon (polyamide). Un laser chauffe la couche de poudre de façon sélective, fusionnant ainsi les particules de poudre formant la première section de l'objet. Pour chaque nouvelle couche, le bac descend et une nouvelle couche de poudre est déposée au-dessus de la première. En même temps que la seconde tranche se crée, elle est fusionnée à la première, constituant ainsi un objet solide. Le procédé est ainsi répété jusqu'à l'obtention complète de l'objet.

- Avantages : résistance, formes complexes qui ne sont pas soumises aux mêmes contraintes gravitationnelles que le FFF, volume de construction important, diversité des pièces produites, possibilité de faire des pièces articulées ou avec des inclusions d'éléments.
- Inconvénients : surface granuleuse (problème esthétique et structurel : amorce de fissures problématiques en surface et coûts importants).
- Applications : composants électroniques, lunetterie et joaillerie, aérospatial, automobile.

2.1.2 Impression de matériaux à base de résine

a) La stéréolithographie (SLA)

Le procédé de stéréolithographie aussi connu sous le nom de *Vat polymérisation* a été inventé en 1986 par le fondateur de la société 3D Systems Charles Hull.

Une des formes de la stéréolithographie les plus répandues est la photopolymérisation (SLA) ou photopolymérisation en cuve, elle consiste à concentrer un rayon lumineux, la plupart du temps un laser UV, dans une cuve remplie de photopolymère, un matériau synthétique dont les molécules se solidifient sous l'effet de la lumière ultraviolette.

Ainsi, le laser se déplace et solidifie la matière à la surface du bac, créant une première tranche. La plateforme supportant le bac descend progressivement, selon l'axe z (voir la figure 2), afin que le laser solidifie la tranche suivante, et ce, jusqu'à l'obtention finale du modèle.

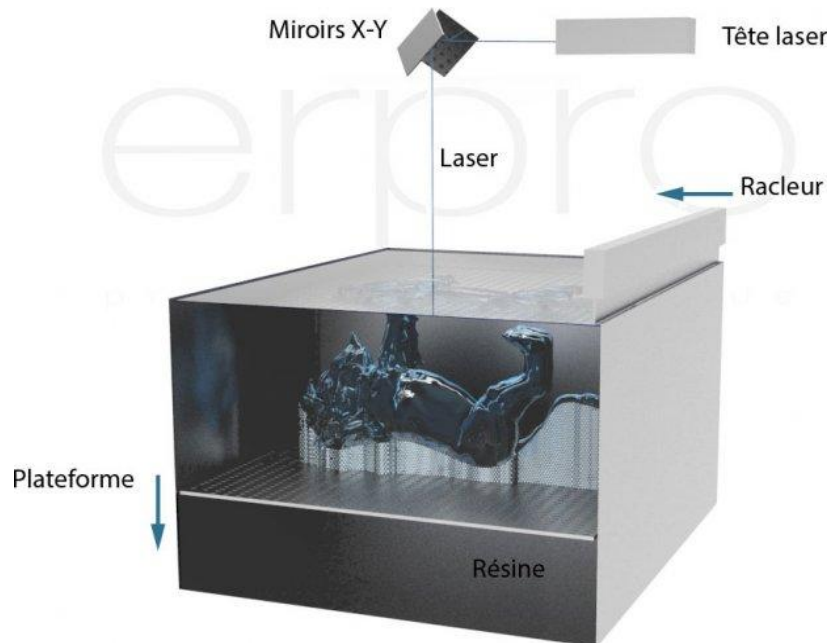


Figure 2 : Représentation du procédé de stéréolithographie (© Erpro & Sprint, 2016)

Une phase post impression est nécessaire. La pièce obtenue doit être nettoyée dans un solvant. Il est également possible de la solidifier à l'aide d'un four ultraviolet.

Ce procédé a donné naissance au format d'impression STL (*Standard Tessellation Language*), format qui est aujourd'hui considéré comme une référence au sein de la communauté de l'impression 3D.

- Avantages : précision de l'impression jusqu'à 6,35 μm , excellente finition, impression de pièces transparentes, plage de rigidité importante (flexible à très rigide).
- Inconvénients : volumes internes problématiques, fragilité des matériaux, vieillissement des pièces (photosensible et durcissement lorsqu'exposé aux UV ambiants).
- Applications : médical et dentaire, pièces artistiques complexes, moules utilisés en fonderie.

b) Projection de matière ou *Material Jetting*

De la même façon que la Stéréolithographie, les procédés des imprimantes 3D haut de gamme *PolyJet* et *MultiJet*, développées par 3D System et réservées à l'industrie, utilisent une lumière UV pour traiter un photopolymère par coupes transversales. Cependant, au lieu de faire appel au balayage d'un laser pour travailler les couches successives, une tête d'impression projette des gouttelettes de photopolymère sur la couche supérieure. La lampe UV reliée aux têtes d'impression joint alors transversalement le polymère et fixe la forme de la couche en place (Imprimantes *Polyjet*).

À noter qu'il existe aussi des thermodurcissables et des cires qui réagissent sous l'effet de la température ambiante (imprimantes *MultiJet*).

- Avantages : combinaison de plusieurs matériaux, dissolution possible des supports, résistant, formes complexes, volume de construction important, diversité des pièces produites, possibilité de faire des pièces articulées ou avec des inclusions d'éléments.
- Inconvénients : surface granuleuse et coûts importants.
- Applications : fidélité de l'impression et bons modèles de représentation des produits.

2.1.3 Impressions à base de métaux

a) Le frittage laser de métal ou *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS)

Utilise l'énergie d'un laser afin d'agglomérer la poudre métallique en dirigeant ce dernier pour qu'il dessine l'objet en question par couches transversales successives. Ce procédé est similaire au procédé SLS expliqué à la section 2.1.1.

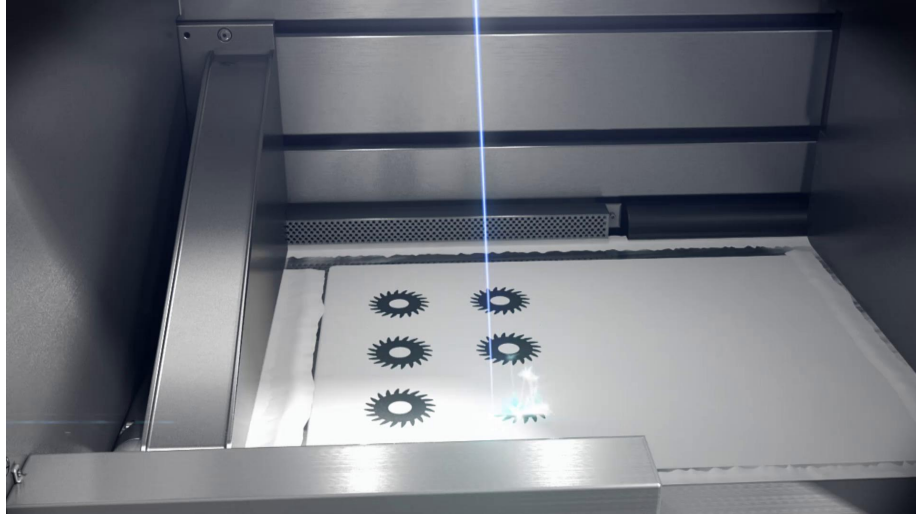


Figure 3 : Frittage laser de Métal ou DMLS (© Stratasys Direct Manufacturing, 2016)

- Avantages : diversité des pièces produites, possibilité de réaliser des pièces articulées ou avec des inclusions d'éléments, précision des pièces réalisées et résistance des matériaux.
- Inconvénients : amorce de rupture en surface (fissure imperceptible en surface qui peut rapidement se transformer en rupture totale), coûts des matériaux (50 fois plus chers que la matière brute) et des imprimantes.
- Applications : composants électroniques, prototypes et objets assemblés, aérospatial.

b) La Fusion par faisceau d'électrons ou *Electron Beam Melting (EBM)*

Développé par la société Arkam, ce procédé utilise un faisceau d'électrons dans une chambre à vide dont la température est comprise entre 700 et 1000 °C , afin de faire fondre et fusionner des particules de poudre de métal, placées dans une cuve mobile, qui descend couche après couche.

Une de ses variantes l'*Electron Beam Direct Manufacturing (EBDM)*, développée par la NASA, permet d'imprimer des objets métalliques d'une très grande variété (titane, aluminium, acier inoxydable) dans un environnement sans gravité.

Cette méthode peut produire des parties métalliques denses, capables de résister à des contraintes plus importantes, tout en conservant les caractéristiques du matériau employé.

- Avantages : qualité et rapidité des pièces produites, moins onéreuses qu'une même pièce imprimée à l'aide de techniques classiques de fabrication soustractive.
- Inconvénients : amorce de ruptures en surface, complexité des techniques d'impression et logiciels associés, coûts importants des machines.
- Applications : aérospatial, automobile, fonderie.

2.1.4 Impression 3D en couleur

a) Le procédé de projection de liant ou *Binder Jetting*

Ce procédé est très répandu auprès du grand public, associé à d'autres processus d'impression au sein de l'industrie, il permet d'obtenir des impressions 3D détaillées et en couleurs.

Un cylindre est utilisé pour étaler une couche de poudre de plastique sur la plateforme d'impression. L'excès de poudre est alors repoussé sur les côtés, assurant ainsi le remplissage du lit avec une couche compacte de poudre. Les têtes d'impression viennent ensuite appliquer un liant liquide et l'encre de couleur de façon simultanée afin de créer une coupe transversale de l'objet sur la poudre.

- Avantages : finesse des détails, haute précision et rapidité d'impression, impression en plusieurs matériaux possible.
- Inconvénients : faible résistance du matériau, sensible à la lumière du soleil et à la chaleur.
- Applications : dispositifs médicaux, prototype et objets complexes et multimatières, prototypes et objets assemblés.

b) Le Laminage par dépôt sélectif ou *Sheet Lamination*

Le laminage par dépôt sélectif superpose successivement des feuilles de matériau afin de former un objet. Ce processus utilise des couches de papier adhésif (plastique ou stratifié) qui sont ensuite collées successivement grâce à un cylindre chauffé, puis découpées à l'aide d'une lame en carbure, couche par couche et selon la forme choisie. Un autre cylindre déplace alors chaque nouvelle feuille de matériau sur la précédente et le processus est répété jusqu'à l'obtention d'un objet complet.

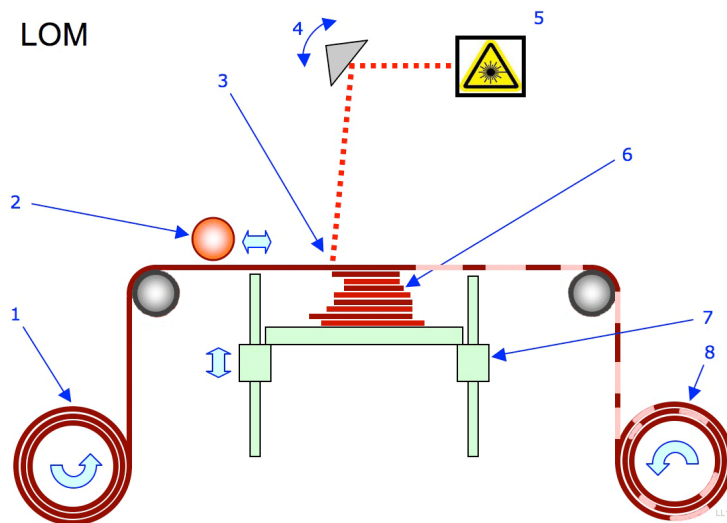


Figure 4 : Illustration du procédé de laminage par dépôt sélectif
(© LaurensvanLieshout, 2010)

- **Avantage** : pièce de grande taille et prix abordable, le papier étant le matériau le moins cher du marché.
- **Inconvénients** : matériaux limités (faible choix de thermoplastique), formes limitées, important travail de finition.
- **Applications** : packaging, contenants, panneaux.

La diversité des techniques d'impression présentée ci-dessus permet de dresser un état des lieux de ce qu'est la fabrication additive à l'heure actuelle.

Qu'elle soit destinée à un usage domestique ou professionnel, à imprimer des métaux, des polymères ou encore des résines, la palette de choix qu'offre l'impression 3D permet de répondre à des besoins variés et spécifiques à de nombreux domaines, des exigences de coûts, de temps de fabrication et de qualité de production qui diffèrent en fonction des attentes de chacun.

2.2 Matériaux d'impression

On distingue parmi les matériaux utiles à l'impression 3D quatre grandes familles : les polymères et les métaux qui sont les deux types de matériaux les plus utilisés, ainsi que les matériaux composites et les biomatériaux.

2.2.1 Les polymères

Une gamme diversifiée de matériaux et de propriétés de matériaux est disponible dans l'industrie des polymères commerciaux, et cette diversité commence maintenant à s'étendre à l'impression 3D. Contrairement aux autres types de matériaux, les polymères possèdent une palette très diversifiée, qui permet de les classer en fonction de propriétés telles que la transparence, la couleur, la résistance à la traction, la rigidité, la biocompatibilité, la résistance à l'humidité, la stérilisation et les émissions de fumée.

On peut classer les polymères en deux groupes : les **thermoplastiques** et les **thermodurcissables** en fonction de leur comportement à des températures élevées. Les premiers sont réversibles, là où les seconds ne le sont pas.

Les thermoplastiques peuvent être ramenés à un état malléable à plusieurs reprises en les réchauffant. Refroidis, ils durcissent. Ils sont donc mis en forme sous l'effet de la chaleur. Les plus répandus pour la fabrication additive sont l'ABS et le PLA au niveau des imprimantes à usage domestique.

Les polymères thermodurcissables sont mis en forme sous l'effet d'un catalyseur (chaleur, rayons UV, agent durcisseur). Ils sont fixés en permanence une fois formés. Ils ne peuvent pas être retravaillés, le durcissement par catalysation étant irréversible.

a) Les thermoplastiques : ABS et PLA

L'**acrylonitrile butadiène styrène** ou **ABS** est un polymère thermoplastique, utilisé par l'ensemble des imprimantes à usage personnel. Fondant entre 200 et 250 °C, une fois durci, l'ABS est capable

de résister à d'importantes variations de température, allant de -20 °C à +80 °C.

C'est un matériau qui n'est pas biodégradable, et contrairement au PLA il émet 10 fois plus de particules lorsqu'il est chauffé. Ces émissions constituent un risque pour la santé (cf. la section 2.5), qui mériterait d'être considéré par les utilisateurs.

L'ABS est utilisé dans de nombreux objets composés de plastiques qui nous entourent : ordinateurs, téléphones, Lego, etc.

L'**acide polyatique** ou **PLA** est le second polymère thermoplastique utilisé par les imprimantes personnelles FDM. Fondant entre 160 et 220 °C, le PLA durcit moins rapidement que l'ABS. En pratique le PLA est plus facile à mettre en œuvre que l'ABS, car moins sensible aux variations de température qui amplifient le phénomène de *warping* (déformation et mauvaise adhérence de la pièce imprimée au plateau) et permet une impression "théorique" sans plateau chauffant.

Fabriqué à partir d'amidon, le PLA est biodégradable et compostable sous certaines conditions. Il est de plus en plus répandu au sein du grand public. À noter que le PLA est hydrophobe et est moins résistant que l'ABS.

b) Polyamides et résines

Le polyamide (PA) est le polymère le plus couramment utilisé dans les procédés de fusion par lit de poudre (c'est-à-dire par frittage au laser). Le nylon est un polyamide synthétique, et les deux termes sont souvent utilisés de façon interchangeable. Les poudres PA ne peuvent pas être réutilisées à perpétuité. La poudre non frittée dans la chambre de construction est chauffée à une température juste au-dessous de son point de fusion, ce qui modifie légèrement ses propriétés thermiques et mécaniques.

Les matériaux utilisés dans les procédés de photopolymères (projection de matière et photopolymérisation en cuve) sont des polymères thermodurcis. La composition des matériaux est généralement développée par les entreprises et gardée secrète. La plupart de ces résines liquides sont mises au point pour se solidifier lorsqu'elles sont exposées à des rayons UV servant d'agent thermodurcisseur. La plupart des fabricants de systèmes de photopolymérisation développent et vendent leurs propres résines, spécifiques à un seul type de machine (Wohlers, 2016).

2.2.2 Les matériaux composites

Les composites sont créés lorsqu'un deuxième matériau : le renfort (le plus souvent solide) est ajouté à un matériau de base : la matrice (plus ou moins liquide). L'un des matériaux de base les plus communs est le polyamide (nylon) utilisé dans les systèmes de fusion sur lit de poudre, mais aussi grandement utilisé dans les systèmes d'extrusion de matière (FDM/FFF). Les matériaux ajoutés pour former un composite comprennent le verre, l'aluminium et les fibres de carbone.

Les matériaux composites sont souvent utilisés afin d'améliorer les propriétés du produit fini, telles que sa résistance à la traction, sa densité ou encore sa rigidité.

a) L'alumide

L'alumide est un matériau composé d'un mélange de poudre de polyamide et de fines particules d'aluminium. Il possède l'aspect du métal, et présente une meilleure résistance à la chaleur que la plupart des thermoplastiques.

Principalement répandu dans les procédés de frittage laser, il est utilisé dans la production de pièces d'apparence métallique, qui ne sont pas exposées à des contraintes physiques trop importantes. L'alumide nécessite un traitement post-impression important (meulage, polissage, traitement de revêtement externe), on le retrouve dans le monde des objets domestiques et éducatifs, ainsi que dans les fabrications de moules de petite série (Berchon, 2014).

2.2.3 Métaux

Les pièces créées à l'aide des procédés SLS (cf. la section 2.1.1.b) et DMLS (cf. la section 2.1.3.a) ont des propriétés mécaniques équivalentes, voire supérieures à celles d'une pièce en métal coulé. En effet, les recherches actuelles permettent de modifier la structure même des métaux imprimés en 3D, en jouant sur un certain nombre de paramètres tels que : la température de fusion, les zones d'impression, les dosages de matières, entre autres.

Un métal possède une ductilité (capacité de déformation sans rupture) qu'il est important de connaître lors de la phase fabrication. Une fois ce point franchi, la pièce en métal risque de présenter des amorces de rupture. Une attention particulière doit être portée à ces amorces de ruptures sur les pièces imprimées en 3D à base de métal.

Principalement répandus dans les industries de pointe telles que l'aérospatial, le domaine chirurgical et dentaire, les métaux utilisés par la DMLS tels que l'acier inoxydable, le titane, le cobalt ou encore l'or et l'argent permettent de créer des structures complexes, jusque-là impossibles à fabriquer par les procédés industriels traditionnels :

- L'aluminium et ses alliages : c'est un alliage classique capable de résister à de fortes charges, utilisé dans les pièces qui composent les moteurs.
- Le cobalt et ses alliages : il est utilisé pour la fabrication de moules à cire perdue, permettant des géométries complexes. Il est répandu dans le domaine biomédical et dans l'ingénierie à haute température.
- Le titane et ses alliages : peu répandu dans les industries traditionnelles à cause de son coût élevé et de sa tendance à présenter des impuretés en cas de mauvaise manipulation, le titane est aujourd'hui repris par l'impression 3D, qui s'avère plus fiable et qui permet d'éviter les phases de soudure. C'est un matériau biocompatible, qui offre une excellente adhérence au tissu osseux

par exemple. Il est cependant 50 fois plus cher que l'acier (Berchon, 2014).

2.2.4 Autres matériaux, opportunités et limites

Face à des ressources limitées (pétrole, minerais, etc..), mais aussi pour développer de nouveaux usages et de nouvelles propriétés, les scientifiques et ingénieurs cherchent à concevoir de nouveaux types de matériaux afin de répondre à de nouveaux besoins. Par exemple, l'utilisation de matériaux tels que le plastique ou le métal pour l'impression 3D pose la question de l'impact environnemental (cf. la section 5.1).

Ces nouveaux matériaux sont porteurs de changements potentiellement importants. On peut donner en exemple dans le secteur de la construction l'utilisation du béton et de sable pour la fabrication de maisons grandeur nature imprimées en 3D ; le bois pour la fabrication de pièces artistiques, la céramique pour des pièces plus techniques.

Plus récemment on a pu assister au développement de nouveaux matériaux aux propriétés étonnantes, tels que les biomatériaux (figure 5) ou tissus biologiques, utilisés dans la création de nouveaux organes à partir de cellules souches ; les matières conductrices capables d'intégrer des microcircuits de la taille d'un grain de sable ; et plus surprenant encore les matériaux 4D via notamment les travaux du MIT LAB et Neri Oxman, capables de s'adapter à l'environnement dans lequel ils évoluent, afin de changer leurs caractéristiques. Beaucoup de recherches sont en cours et seront encore menées dans les prochaines années sur de nouveaux matériaux, enrichissant les possibilités des imprimantes 3D. Il faut toutefois reconnaître que les techniques d'impression 3D ne donnent pas la possibilité de travailler toutes les matières, ce qui en limite et en limitera la portée pour encore plusieurs années.

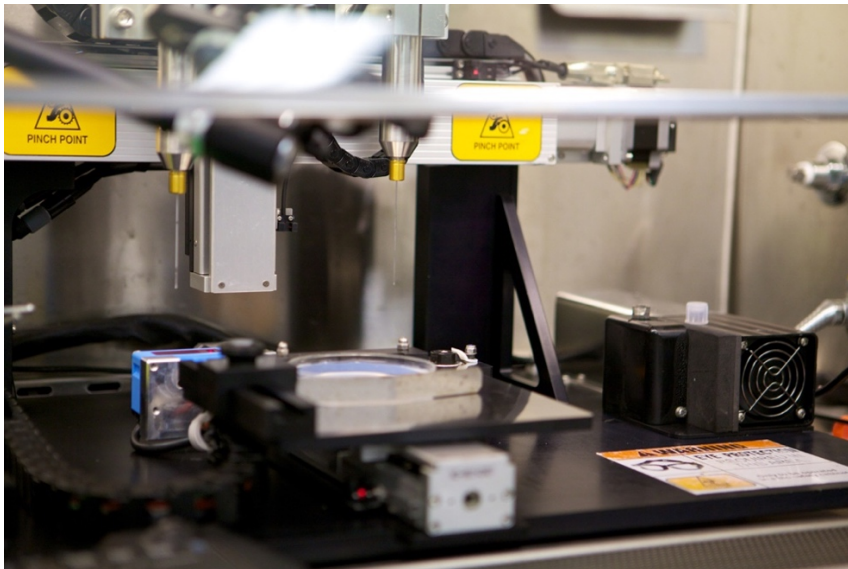


Figure 5 : Imprimante ayant recours à des biomatériaux pour recréer des tissus humains (© Organovo,2016)

2.3 Procédés et techniques d'impression 3D

La création de prototypes a longtemps requis une machinerie chère et un investissement dans des logiciels sophistiqués de CAO (Bouffaron, 2014). Cette double barrière économique et technique a longtemps empêché les entrepreneurs amateurs et le grand public de concevoir des produits. L'impression 3D vient lever cette barrière à l'entrée.

Depuis maintenant quelques années, on voit apparaître des outils de scannage et de modélisation accessibles et faciles d'accès. On assiste ainsi à une simplification des procédés. La grande majorité des ordinateurs grand public permet de faire fonctionner des logiciels sophistiqués tels SolidWorks, Sketchup ou encore le logiciel libre et gratuit Blender. De plus en plus de néophytes utilisent 123D Design développé par Autodesk (gratuit), spécifiquement développé pour l'impression 3D grand public.

2.3.1 Modélisation et numérisation

Afin d'imprimer un objet en 3D, il est nécessaire de recourir à des logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO), qui permettent de définir les caractéristiques de cet objet (volumes, proportions, densité, etc.). Pour ce faire, il existe 3 catégories de modeleurs destinés aux particuliers et professionnels. 1) Les **modeleurs volumiques** permettent de travailler avec des objets aux formes simples par ajout, soustraction ou assemblage de formes. Modeleurs connus : *Solid Edge* ou *SolidWorks*. 2) Les **modeleurs surfaciques** permettent de définir mathématiquement l'enveloppe de l'objet. Modeleurs connus : *SketchUp pro* (contrôle de l'étanchéité difficile des formes au niveau des intersections), *Rhinoceros* et *ZBrush*. 3) Les **modeleurs paramétriques** ont recours à des algorithmes spécifiques pour concevoir des objets en 3D. Ces modeleurs permettent de créer des pièces complexes avec précision, qui sont paramétrables par la suite. Les modeleurs paramétriques les plus connus à l'heure actuelle étant *Catia* et *Fusion 360*, également modeleur volumique et surfacique.

Modeleur 3D	Conception mécanique (Architecture, pièces techniques)	Sculpture digitale (Formes organiques, figurines)	Difficulté d'apprentissage	Prix
3ds Max	Non	Oui	Difficile	> 1000 \$
AutoCAD 3D	Oui	Non	Difficile	> 1000 \$
Blender	Non	Oui	Difficile	Gratuit
Catia	Oui	Non	Difficile	> 1000 \$
Maya	Non	Oui	Difficile	> 1000 \$
Rhinoceros	Non	Oui	Difficile	> 1000 \$
Solid Edge	Oui	Non	Difficile	< 1000 \$
SolidWorks	Oui	Non	Difficile	> 1000 \$
Sketchup Pro	Oui	Non	Assez facile	< 500 \$
ZBrush	Non	Oui	Difficile	< 1000 \$
Fusion 360	Oui	Oui	Difficile	Gratuit à 1500 \$

Figure 6 : Tableau comparatif des principaux modeleurs existants sur le marché (d'après Berchon, 2014)

En complément ou en amont de la modélisation, il est possible de recourir à des scanners 3D qui permettent de numériser rapidement n'importe quel objet dans l'optique de le reproduire avec une imprimante 3D. Il existe deux types de numérisation, dite active et passive (Larandea, 2016).

Parmi les méthodes dites actives, 1) la numérisation par triangulation laser utilise un laser qui joue le rôle d'une caméra inversée pour marquer un point dans la scène et faciliter l'appariement. Cette technologie à laser blanc est plus performante et offre une très bonne précision qui permet de mesurer la couleur. Toutefois, il s'agit d'un processus assez lent. 2) La deuxième approche active est la numérisation en temps de vol, technologie utilisée dans la « Kinect 2 », elle permet de récolter des coordonnées 3D qui sont transmises en nuage de points, souvent assez bruités, auxquels on peut rajouter des textures, permettant ainsi de reconstruire un modèle 3D plus précis. 3) La numérisation par défocalisation est la troisième approche active, mise au point au Laboratoire de vision et systèmes numériques de l'université Laval, elle offre une vision orientable à l'aide d'une caméra, d'un laser et d'un mécanisme parallèle. 4) Enfin, l'approche active par numération de contours (*space carving*) permet de reconstruire la forme d'un objet en 3D, à partir de points (angles et repères fixes). Cette technologie capte les contours de l'objet à numériser pour reconstruire la forme en 3D. L'approche par capteur tenu en main fait appel à la numérisation de contours.

2.3.2 Optimisation

La fabrication additive, contrairement aux techniques d'usinage traditionnelles, permet de réaliser des pièces aux géométries complexes dont le poids total peut être optimisé à l'aide d'une méthode numérique appelée « optimisation topologique ».

Cette technique consiste à supprimer à l'aide d'un logiciel simulant les contraintes structurelles la matière jugée en excès, c'est-à-dire celle dont la suppression n'aura aucun impact sur les propriétés mécaniques recherchées de l'objet produit. Parmi les plus connus, on retrouve ainsi les logiciels *DesignSpace* de l'éditeur *Ansys*, *Tosca* de Dassault Systèmes, *Within Labs* d'Autodesk, *Fusion 360* ou encore *Inspire* de SolidThinking.

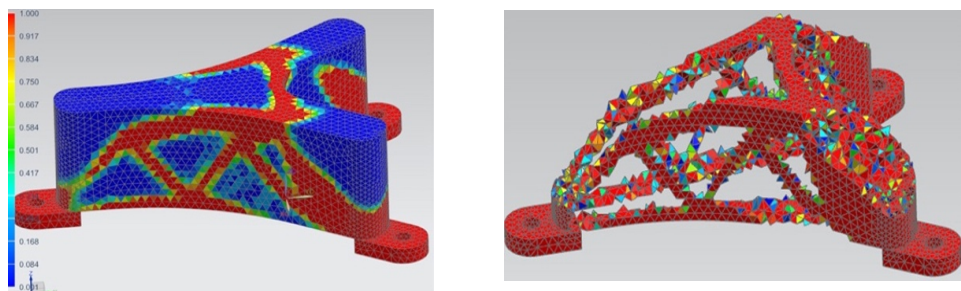


Figure 7 : Pièce modélisée en 3D, avant et après optimisation topologique (© 3Dnative, 2016)

À l'aide d'algorithmes, les logiciels d'optimisation topologique simulent les contraintes appliquées à un objet conçu en 3D, afin d'identifier des zones indispensables – représentées en rouge sur la figure 7 – et les zones de matière qui n'impactent pas la résistance de l'objet – telles que celles représentées en bleu sur la même figure. Ceci afin de proposer un objet évidé, dont la forme est optimisée sans pour autant altérer la résistance de ce dernier, tel que représenté sur la figure ci-dessus.

Il est également possible d'optimiser l'objet sous sa forme numérique en l'orientant de façon à limiter les pertes de matériaux à l'impression les cassures, et améliorer la qualité de la finition en fonction de l'orientation des couches. Comme le synthétisent Brument et Campagnoli (2016) :

« Qu'il s'agisse d'économiser la matière, de supprimer des étapes, de ne produire que ce qui est nécessaire, d'optimiser les formes, les poids, la taille et la performance des objets, ou encore les procédés de fabrication eux-mêmes ; c'est bien là que se dessinent les contours de [l']usine du futur, plus petite, partiellement dématérialisée ».

2.4 Impression 3D, open source et techniques de production

Depuis l'apparition des imprimantes répliquantes RepRap en 2005, et des plateformes de collaboration de fichiers 3D en libre accès en 2008, l'impression 3D est à l'origine de bouleversements industriels qui sont source d'innovation.

Projet RepRap :

Le projet Rep Rap - Replication rapid prototyper - porté depuis 2005 par le professeur Adrian Bowyer est la 1ère machine autorépliquante développée par l'homme.

Ce projet collectif et collaboratif vise à développer des logiciels et des procédés (FDM) d'impression 3D accessibles au plus grand nombre.

Basé sur le libre accès, les composants, les recherches et les pièces fabriquées sont open source: <http://reprap.org/wiki/RepRap/fr>.

C'est un exemple des nombreuses formes réticulaires que peut prendre l'impression 3D, via la personnalisation et la production de masse.



Imprimante Reprap (© Adrian Bowyer, 2005)

Buijn et Jong (2013) montrent ainsi que les communautés d'utilisateurs innovateurs, qui participent à la diffusion de l'impression 3D en libre accès, ont le potentiel de changer une industrie. Wittbrodt (2013) mentionne qu'une adoption à grande échelle des imprimantes RepRap pourrait changer les modes de consommation. En effet, en plus de décentraliser la production (cf. notamment la section 4.3), il risque de modifier les procédés de sélection des produits. En effet, Wittbrodt explique que le consommateur a tendance à acheter des produits avec le coût initial le plus bas plutôt que le plus économique à long terme.

Ces techniques et pratiques de l'*open source* ouvrent ainsi un espace alternatif de liberté, d'échange, collaboratif et participatif, dont il est important de préciser les limites et les dangers associés à la diffusion de ces données (Brument et Campagnoli, 2016).

Ces différents aspects de l'*open source* et des pratiques collaboratives seront développés plus loin (cf. la section 4.4.2) avec notamment l'émergence des *Fablab* (voir la section 5.2) et leur impact sur les techniques de production.

2.5 Design et esthétique nouvelle

La dialectique numérique entre logiciels (CAO, optimisation, etc.) et impression 3D, ouvre de nouveaux paradigmes de conception, production, distribution et consommation, au travers de pratiques qui évoluent vers un modèle adaptatif, personnalisable et hyper optimisé (cf. la section 4.5).

Il va sans dire que la fabrication additive questionne les notions de standard de production et plus largement la question de l'esthétique, à l'image du projet *Re-inventing shoes* développé par United Nude et 3D System en 2015.

Projet Re-inventing shoes :

Le projet Re-inventing shoes développé par United Nude et 3D System dans le cadre de la semaine du design à Milan en 2015 avait pour objectif d'explorer les possibles de l'impression 3D, en laissant libre cours à 5 designer et architectes :

Ben van Berkel, Fernando Romero, Michael Young, Ross Lovegrove et Zaha Hadid.

Les pièces ont été produites en polyamide et polyuréthane thermoplastique (PLA), puis teintées après impression au frittage laser sélectif.

Talon haut « Ilabo », Ross Lovegrove
(©3DZ, 2015)



Face à de nouvelles possibilités, des formes complexes réalisées à l'aide de puissants algorithmes, l'apparition de nouvelles matières et processus de conception, des produits nouveaux sont réalisables là où auparavant, ils n'auraient pas été fabricables à petite ou grande échelle. Ces nouvelles possibilités techniques pourraient entraîner une évolution de la notion d'esthétique dans la société.

2.6 Défis technologiques et limites

La fabrication additive se développe actuellement de manière à être plus accessible. Les produits sont de plus en plus diversifiés (accessoires, bijoux, art, prototypes) et les machines sont de plus en plus simples d'utilisation et financièrement abordables. Malgré les avancées technologiques, il est possible d'émettre un certain nombre de limites. Le choix restreint de matériau en est une, déjà abordée à la section 2.2.4.

Gao et al. (2015) critiquent la tendance des logiciels de modélisation à nécessiter un apprentissage très complexe avant de pouvoir être utilisé efficacement. Les auteurs mettent en avant la nécessité de pousser le développement de systèmes de simulations et d'optimisation de l'impression afin de prévoir certaines données telles que : la température, les risques de fissure, les propriétés de la matière, et ce, afin d'éviter les erreurs de fabrication.

Selon Bouffaron (2014), les imprimantes, notamment celles utilisées dans les secteurs de l'aéronautique et de la défense, et en particulier celles permettant de produire des pièces métalliques, représentent un coût élevé à l'investissement. L'auteur soulève également la question du coût des matériaux, et les temps d'impression (les poudres de métaux sont jusqu'à 30 fois plus chères (en poids) que l'équivalent de matière brute) et la durabilité des matériaux.

Si l'impression 3D n'en est pas à ses débuts, les recherches concernant l'impact de ses procédés et des objets produits sur l'être humain ne font que commencer.

Il est important de questionner la toxicité et les risques pour la santé que peut représenter l'utilisation des imprimantes et surtout des matériaux. D'autant plus que plusieurs matériaux nouveaux sont en développement

et que l'on peut légitimement se poser la question de leur neutralité vis-à-vis de la société et de l'environnement. Cela pose la question de la sensibilisation, des normes (cf. partie 3.1.1), et du public à qui se destinent ces matériaux et objets fabriqués. Par exemple, il n'est pas sûr que la question de la présence ou de l'absence de BPA, dont on connaît aujourd'hui les dangers en tant que perturbateur endocrinien, soit toujours prise en considération à sa juste mesure lors de la fabrication d'objets imprimés. Ainsi, si l'ABS ne contient pas de BPA, il est cependant possible d'en retrouver dans les composites PC-ABS.

Résumé

- Parler d'impression 3D au singulier est trompeur devant les multiples technologies, matériaux, etc. A minima, il faut distinguer l'impression 3D de type personnel de l'impression 3D de type industriel. La première est économique, mais avec un niveau de qualité plus faible. Elle est utilisée également par des entreprises à des fins de prototypage, R&D, test, maquette, échange avec les clients, etc. ; la seconde peut être utilisée en production sur une vaste gamme de matériaux, avec d'excellents niveaux de finition, mais nécessite un investissement important. Elle est néanmoins accessible comme fournisseur à qui l'on envoie des fichiers numériques, que l'on récupère par la poste quelques jours plus tard. Dans le rapport, on traite des différentes technologies disponibles, de leurs avantages, inconvénients et de leurs principaux domaines d'applications.
- Malgré la limite quant aux matériaux utilisables, il y a une diversité de matériaux aux propriétés différentes utilisables : plastiques, métaux, matériaux composites, biomatériaux — sans considérer les recherches en cours sur de nouveaux matériaux.
- L'impression 3D repose sur trois éléments clés : la modélisation, l'optimisation et la numérisation. Les avancées dans chacun de ces domaines augmentent la portée et les impacts de l'impression 3D.
- L'impression 3D rend possibles de nouvelles esthétiques, et par là même, à la capacité de transformer la notion d'esthétique dans la société.

Abstract

- Discussing 3D printing in a singular manner is misleading in view of the multiple available technologies, materials, etc. At least, the distinction between personal 3D printing and industrial 3D printing is necessary. The first is cheaper but of lower quality. Furthermore, businesses also use it for prototyping, R&D, testing, modeling, client exchange, etc. The second can be used for production on a wide range of materials and with excellent finishes but requires significant investment. Otherwise, it is accessible through a supplier to whom we send digital files that we can recover a few days later by mail. In the report, we explore the different kinds of available technologies, their strengths and weaknesses as well as their main application areas.
- Despite the limited use of materials, a diversity of material with different qualities are useable: plastics, metals, composite materials, biomaterials – not to mention ongoing research for new materials.
- 3D printing is based on three key components: modeling, optimization and digitalization. The advances in each of these fields increase the scope and their impacts on 3D printing.
- 3D printing enables new aesthetics and even the capacity to transform the aesthetic notion in society

Impression 3D et organisation

Partie 3. Impression 3D et organisation

L'impression 3D a plusieurs impacts, visibles ou non sur l'organisation. Associée à d'autres technologies numériques, elle tend à aplanir les structures et à augmenter la collaboration et les échanges de connaissances interorganisationnelles. Elle contribue à la transformation des chaînes de production, aussi bien dans les étapes de conception que dans les étapes de production et dans le lien avec l'utilisateur. Elle transforme également la chaîne d'approvisionnement : aujourd'hui 17 % des industries canadiennes ont recours à l'impression 3D dans leurs processus de fabrication (Wohlers, 2016). Elle permet également l'adoption de nouveaux modèles d'affaires. Cette troisième partie aborde ces différents enjeux pour les organisations.

3.1 Adoption de la fabrication additive dans les organisations

3.1.1 La normalisation de la fabrication 3D

En parallèle à la diffusion de l'impression 3D et à ses avancées technologiques, le déploiement de la fabrication additive passe également par la normalisation, notamment pour sa branche industrielle. La fabrication de pièces nécessite en effet de pouvoir garantir leur utilisabilité à travers le temps et de pouvoir certifier leur fiabilité.

Le comité technique international ISO/TC 261 est responsable de la normalisation dans le domaine de la fabrication additive (FA). Ces certifications concernent les procédés, les termes et les définitions, les chaînes de processus (matériels et logiciels), les procédures d'essai, les paramètres de qualité, les accords de fourniture et tous types d'éléments fondamentaux. Ce comité technique international se divise, aujourd'hui, en quatre groupes de travail qui élaborent des normes : 1) terminologie, 2) méthodes, processus et matériaux, 3) méthodes d'essai et 4) traitement des données. Parmi les objectifs de ces normes, on retrouve la volonté de fixer un vocabulaire international au domaine de la fabrication additive, de stabiliser les procédures pour faciliter leur adoption et réduire leur coût. Le tout, afin de permettre de concentrer les efforts autour de projets et produits techniquement compatibles. Ces normes permettent également de définir un cadre légal autour de la fabrication additive et de permettre aux entreprises d'établir un cadre de négociation (Magistrelli, 2016).

La normalisation de la fabrication additive permet donc d'augmenter la diffusion des pratiques, mais aussi de limiter les éventuelles dérives et contrefaçons. Selon Catherine Lubineau, directrice technique de l'union française de normalisation de la mécanique (UNM) :

« il est nécessaire de maîtriser à la fois le procédé, mais aussi les contrôles sur les pièces pour qu'elles durent dans le temps. Le principal défi de la normalisation de la fabrication additive sera d'assurer une certaine cohérence au sein des différents domaines concernés par l'impression 3D, sans pour autant limiter l'innovation et la créativité qui sont permises par les procédés de fabrication additive » (Lefèvre, 2016).

3.2 Nouvelles formes organisationnelles induites par la fabrication additive

3.2.1 Collaboration

Il est de plus en plus admis dans la littérature que les technologies numériques favorisent de nouvelles formes organisationnelles basées sur la collaboration entre individus et/ou organisations. La fabrication additive ne fait pas exception. Ainsi, on voit émerger une multitude de plateformes locales d'innovation (intra et interorganisationnelles), permettant le développement de la création de biens dans des lieux peu enclins à la production directe. Selon Chris Anderson (dans Bouffaron, 2014, p. 8) :

« les techniques d'impression 3D sont des outils de collaboration hors du commun qui vont accélérer les innovations et les ruptures dans le monde matériel et la production, à l'instar d'Internet qui démultiplie l'innovation, les collaborations et les ruptures dans le monde digital ».

Au sein des organisations, la conception n'est plus cloisonnée. Elle est maintenant transdisciplinaire et numérique tout autant que physique (cf. la section 3.3.1.b). Les plateformes locales d'innovation aident à trouver des alternatives aux approches en silo, afin de favoriser la collaboration et le partage des données au sein de différents secteurs d'une même entreprise. Dans le cas d'entreprises de plus petite taille, la collaboration numérique est aussi physique. Le prototypage rapide et les objets transitionnels (cf. la section 3.3.1.c) permettent ainsi de tester plus rapidement les produits en supplantant les contraintes temporelles de production traditionnelles. Par la même occasion, cela permet d'innover en donnant une forme à des idées, et à la réflexion des concepteurs de manière quasi instantanée.

À l'échelle de la communauté, la démarche de collaboration permet la personnalisation des produits. On assiste aujourd'hui au développement de «co-produits», développés avec le retour sur l'expérience des usagers, que ce soit au travers de plateformes de fichiers d'impression 3D en libre-service, de Fablabs, ou de services d'impression 3D sur mesure, tels ceux proposés récemment par Amazon. La complexification de la chaîne de production entraîne une augmentation de la collaboration permettant de faire face à la complexité croissante du marché, à la diversité des connaissances, des compétences et des matériaux (voir la Figure 8).

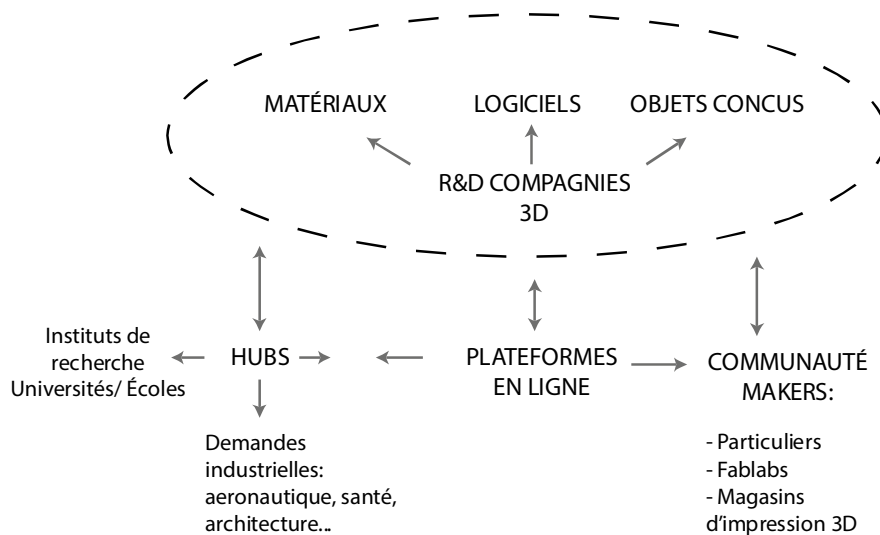


Figure 8 : Collaboration et chaîne de valeur de l'impression 3D

3.2.2 Approche horizontale (relation hiérarchique aplanie)

Au sein l'organisation, l'impression 3D contribue à la transformation des modèles hiérarchiques traditionnels. Elle modifie en simplifiant les outils technologiques du processus de création et de développement de projets, tout en augmentant le niveau de compétences requis. Elle encourage également les initiatives intrapreneuriales, ou encore élargit l'éventail des contributeurs potentiels au sein d'un projet commun. Ainsi, à l'instar des wikis — tel Wikipédia — s'inscrivant dans la sphère du partage de l'information et du savoir, les imprimantes 3D contribuent à l'émergence d'un écosystème favorisant une dynamique similaire, mais dans l'univers matériel. La fabrication additive et l'*open source* s'associent donc naturellement (voir la section 3.1.4). Ce contexte permet ainsi de fédérer les acteurs de projets au sein des organisations, en produisant des structures organisationnelles plus diversifiées et flexibles, favorisant les processus transversaux. Là où auparavant ces acteurs se seraient inscrits dans une logique plus hiérarchique et silotée, ils se retrouvent plutôt au sein de structures en réseaux et modulables.

La question se pose alors de savoir si le rapport dématérialisé à l'objet et la collaboration numérique influencent ces modèles d'organisations, afin de les rendre plus perméables aux échanges entre les différentes fonctions organisationnelles et les niveaux hiérarchiques.

La fabrication additive, à travers la cohabitation numérique/physique qui peut prévaloir, permet de dépasser ces frontières propres aux organisations traditionnelles. Cependant, il est important de ne pas confondre, d'une part l'*open source*, les plateformes d'innovation collaborative au sein de l'entreprise, et, d'autre part les processus décisionnels, et la part de responsabilité qui subsiste au sein de la hiérarchie.

3.2.3 Diffusion de connaissances interorganisationnelles

La diffusion de nouvelles connaissances et le partage de fichiers au sein des communautés de l'impression 3D et à l'extérieur des entreprises, renvoient directement à la notion d'innovation ouverte développée par Chesbrough (2006, p. 2), comme étant : «l'utilisation d'entrées et de sorties volontaires de connaissances pour accélérer l'innovation interne et élargir les marchés afin de développer de nouvelles formes d'innovations».

Chesbrough développe le concept d'innovation ouverte par opposition à la conception de l'entreprise travaillant déconnectée des acteurs qui lui sont extérieurs. Dans l'innovation ouverte, les entreprises peuvent et doivent utiliser des connaissances et des idées externes autant qu'internes à l'organisation. Il en va de même pour l'adoption et l'utilisation de canaux internes et externes au marché, de manière à diffuser et faire progresser leurs propres technologies ou marchés qu'elles n'exploitent pas — ou pas suffisamment — en interne (voir la figure 9).

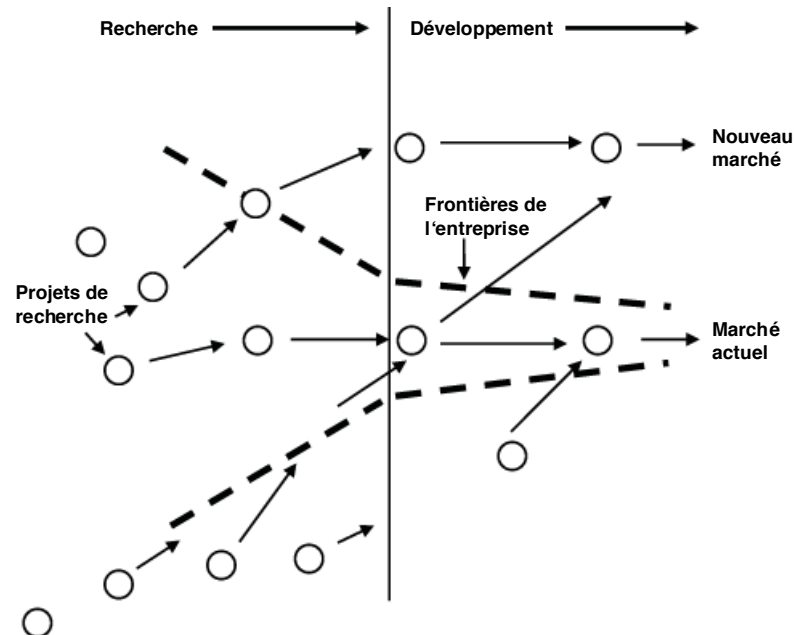


Figure 9 : L'innovation ouverte présentée pour les industries de R&D (Chesbrough, 2006)

L'innovation ouverte renvoie aux fondements de la diffusion des savoirs également associés à l'impression 3D via les plateformes collaboratives et les différentes pratiques de l'*open source*. Ces nouveaux modes de collaboration à l'extérieur de l'entreprise ont inspiré de nouvelles façons créatives de collaboration et de générations d'idées, telles que l'idéation, les concours de design, le scoutisme technologique et les tournois *multi-sourcing* (Van der zee et al., 2015). De plus, l'innovation ouverte et l'*open source* fournissent également de nouvelles opportunités aux consommateurs, tel que cela sera détaillé à la section 5.3.

Cette ouverture des entreprises à l'innovation présente tout de même deux risques majeurs qui sont ceux (1) de la propriété intellectuelle, et; (2) de la

perte de contrôle des résultats. La question de la fabrication additive et des droits de propriété intellectuelle porte aujourd'hui à controverse :

«Alors que la communauté de l'impression 3D voit les droits de propriété intellectuelle comme une forme de réglementation qui favorise les grandes entreprises, les entreprises considèrent l'impression 3D comme un outil potentiel de piratage de produits» (Van der zee et al., 2015).

Face au nombre important de brevets associés à la fabrication additive déposés chaque année, la fragmentation et la diversité des pratiques de l'impression 3D, et le développement de l'*open source*, la question se pose aujourd'hui des limites de l'impression 3D et de son développement. À qui la fabrication additive et la propriété intellectuelle profitent-elles vraiment? Cette perte du contrôle de la propriété intellectuelle des entreprises favorise-t-elle la réappropriation de ses processus par les particuliers et petites entreprises?

Selon Lefèvre (2016), le développement de l'impression 3D demande des efforts de recherche et, souvent, une collaboration entre des sociétés, et de façon plus spécifique, une participation aux projets des industries, des universités et des gouvernements. Le partage d'informations est alors critique au succès de ces projets internes trop peu diffusés. Il convient non seulement de faciliter le partage d'informations entre les partenaires, mais aussi de contrôler et de protéger les informations partagées afin de respecter les problématiques de propriété intellectuelle. De ce point de vue, les approches telles que celles du CRIAQ au Québec ou du CARIC au Canada dont plusieurs projets portent sur l'impression 3D dans le secteur aéronautique servent de modèle au niveau international.

3.3 Transformation de la chaîne de production

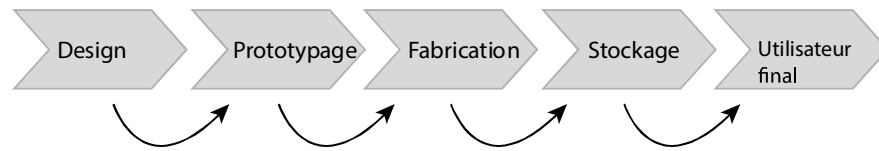
3.3.1 En amont : la conception

a) Cohabitation numérique/physique permise par l'impression 3D

La souplesse offerte par l'intégration de la chaîne numérique dans les procédés de production en modifie la structure et l'économie, les processus et le fonctionnement, l'échelle et même la localisation (Brument & Campagnoli, 2016). Les outils de partage numériques permettent de concevoir une pièce à un point du globe et de la mettre en œuvre à des milliers de kilomètres via un simple envoi de fichiers. Inversement, il devient également possible, à partir d'un investissement relativement modeste, de trouver à proximité, des sources de fabrication — pour des pièces aux géométries complexes — et de les obtenir dans un délai de quelques heures à quelques jours (cf. la section 3.3.2.c).

Auparavant dissociés dans la chaîne de production traditionnelle, le numérique et le physique cohabitent aujourd'hui de façon quasi instantanée, et ce, grâce aux procédés de fabrication numérique, dont l'impression 3D. Ainsi, la figure 10 illustre ce rétrécissement dans les procédés de conception et fabrication, que la chaîne numérique permet d'écourter.

Chaîne de production utilisant la fabrication traditionnelle



Chaîne de production utilisant la fabrication additive

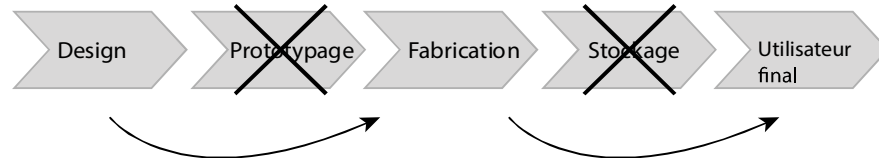


Figure 10 : Comparaison des chaînes de production utilisant la fabrication traditionnelle et additive

Initialement destinée au prototypage rapide, l'impression 3D investit aujourd'hui les petites entreprises, les marchés de niche et leur permet de se développer plus facilement à l'échelle internationale, notamment à travers une capacité d'agir rapidement et à moindre coût.

Cette réduction des coûts liée à l'envoi instantané de fichiers aux machines numériques permet aux entreprises de gagner un temps précieux, ce coût ne représentant que peu en comparaison à l'expédition d'un produit fini. La cohabitation numérique/physique est encore facilitée par la baisse de la courbe d'apprentissage liée à la simplification des logiciels de CAO tels que Autodesk, Sketchup, Rhino, 3DSmax, Blender ou encore Autocad pour ne citer que les plus connus, et la multiplication de plateformes de partage de fichiers en libre accès telles que Thingiverse, Pinshape, Myminifactory.

b) Prototypage rapide et cycle d'innovation

La fonction première de la fabrication additive a été de développer et de tester de nouveaux produits sans avoir à s'affranchir des contraintes temporelles généralement associées à la fabrication de ces objets utiles aux phases de conception en amont d'une production à grande échelle. Auparavant associé à des chaînes de production de petite taille, le prototypage de produits représente environ les trois quarts des applications actuelles de l'impression 3D. Elle offre aujourd'hui la capacité d'accélérer le cycle d'innovation et de commercialisation au sein d'industries d'échelle mondiale (ISDE, 2016).

Il est d'ailleurs important de distinguer le prototypage rapide du prototype. Le premier renvoie à la fonction première de l'impression 3D et est uniquement associé aux premières phases de conception. Le second correspond à l'ensemble des objets fabriqués par l'impression 3D, qu'il s'agisse de maquettes, de pièces destinées à l'usage domestique ou encore de pièces de rechange.

À l'inverse des technologies traditionnelles qui font appel à des processus longs et coûteux, les technologies de l'impression 3D, en réduisant les coûts et les délais de production, permettent de multiplier les explorations et les expérimentations. Et par la même occasion d'améliorer le processus de développement, afin de créer plus de valeur pour le produit final, ou encore autant de valeur à moindre coût.

L'amélioration des processus de conception par le design permet d'augmenter la rapidité et le nombre d'itérations nécessaires au développement de produits tout en améliorant l'adéquation de ces produits au besoin des usagers grâce notamment à la possibilité de procéder à plus de tests de validation auprès de ces usagers.

Ils permettent également la création d'artefacts nouveaux comme des démonstrateurs (objets utiles à la création et au processus d'itération) qui génèrent des échanges, sources de connaissances (Mahmoud-Jouini, 2016), à l'image des d'objets frontières (cf. la section 3.3.1.c), qui permettent d'étendre le processus de développement de produits à d'autres acteurs et à d'autres formes de collaboration.

Le prototypage rapide, rendu possible par l'impression 3D est aujourd'hui considéré comme un outil d'itération et de réflexion, lequel joue le rôle de passerelle entre le monde numérique et physique, l'idée et l'objet définitif, le concepteur et l'utilisateur (Norman et Verganti, 2014).

c) Objets-frontières : approche par l'expérience et le sens

La notion de sens attribuée à un objet n'est pas nouvelle, que celui-ci soit issu du travail manuel d'un artisan ou d'un processus industriel. L'objet a toujours pris des sens multiples. Barthes (1985) décrit l'objet comme, à première vue, entièrement absorbé dans une finalité d'usage, dans ce que l'on appelle une fonction. Il agit par essence comme une sorte de médiateur entre l'action et l'être humain. Ce dernier l'utilise comme extension de son corps ou de son esprit (Leroi-Gourhan, 1964). Il y prend alors du sens. Ainsi Barthes voit dans la signification que l'on peut attribuer à un objet, au-delà de sa valeur pratique, une valeur sociale et une valeur idéologique.

La sémantique de l'objet renvoie souvent à la relation entre la forme et la fonction. Face à au développement des technologies, il devient possible de jouer avec principe d'affordance (capacité d'un objet à suggérer son utilisation intuitive). En effet, la complexité des objets conçus numériquement et imprimés en 3D rend parfois le sens de ces objets difficile à définir.

Par la relative facilité d'opération des outils d'impression 3D et leur capacité à imprimer rapidement des objets et des prototypes fonctionnels, ces outils et ces nouveaux processus peuvent également jouer un nouveau rôle d'intermédiaire entre concepteur et utilisateur/client, transformant dans la foulée la relation exécutant-donneur d'ordre. Le prototype sert d'objet-frontière (Star, 1989) c'est-à-dire d'objet aidant à passer à travers la frontière propre aux compétences de chacun et facilitant ainsi le dialogue entre les différents concepteurs.

Par exemple, un client aura une meilleure compréhension d'un objet en le manipulant, plutôt qu'en l'imaginant au travers de sa représentation numérique 2D ou 3D. Il pourra plus facilement exprimer ses attentes, ses critiques ou les points positifs du projet/produits à conserver, permettant une amélioration du produit fini. Les parties prenantes sont généralement les spécialistes de la réalisation d'un projet commun interdisciplinaire. Ces objets, fabriqués en impression 3D deviennent des objets médiateurs permettant de créer le dialogue, des discussions sur certains grands projets technologiques, environnementaux, sociaux, territoriaux, etc.

Ainsi, d'après Lehmann (2016), l'usage des objets-frontières imprimés en 3D permet d'accroître l'engagement de la part des acteurs impliqués dans les grands projets en plus de faciliter l'acquisition de savoirs et de connaissances pertinentes au définir.

3.3.2 En aval : la production

L'impression 3D bouscule les processus de conception en amont de la chaîne de production, via notamment les nouvelles formes de cohabitation numérique-physique, le prototypage rapide et son apport dans le développement d'un produit en lien avec les utilisateurs finaux, ou encore la contribution des objets-frontières dans l'engagement et les échanges au sein d'une équipe de conception. Ces nouveaux modes de conception impactent directement les processus en aval, en transformant les chaînes d'approvisionnement et de production, tant sur le plan organisationnel, que socio-économique (voir les parties 4 et 5).

a) Transformation de la chaîne de production

De la fabrication d'un objet à sa mise sur le marché, l'objet traverse de nombreux processus de production traditionnels allant de l'emballage, au transport, de son utilisation jusqu'à son recyclage. Ces étapes sont aujourd'hui bouleversées par l'apparition de la fabrication additive.

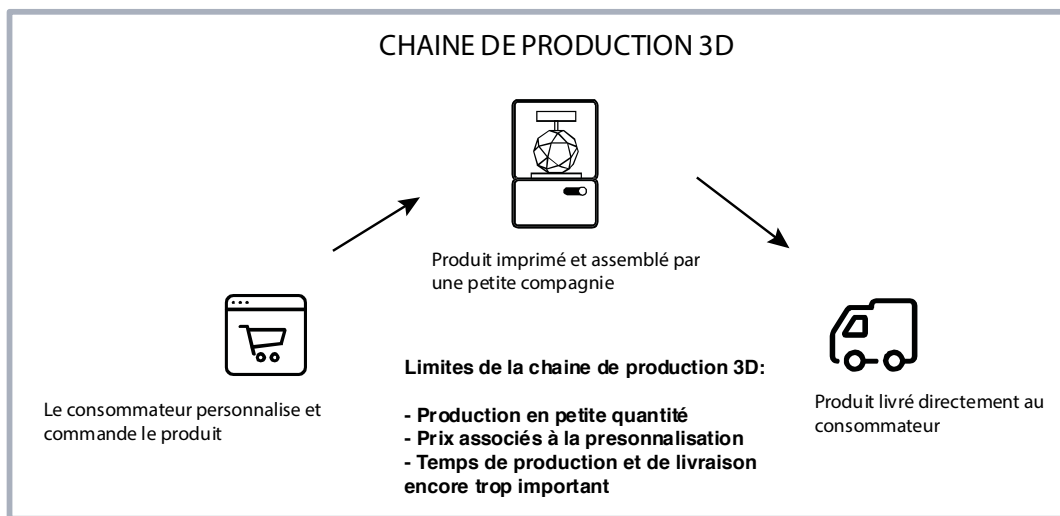
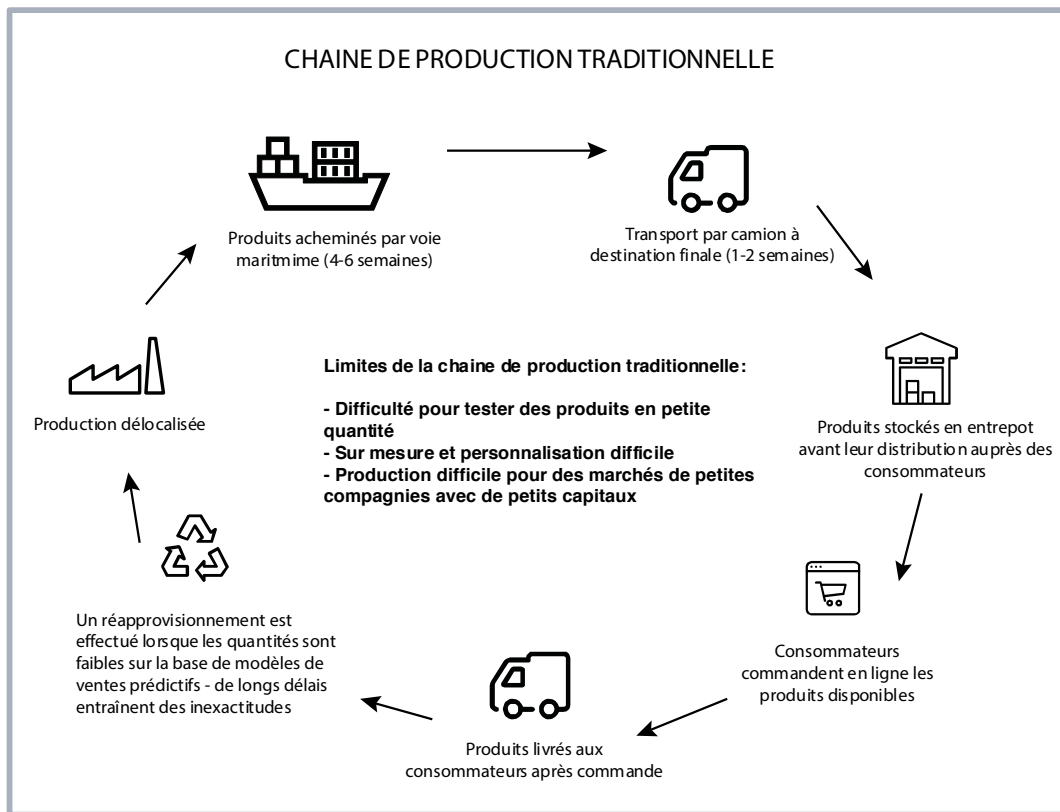


Figure 11 : Modélisations simplifiées d'une chaîne de production traditionnelle et d'une chaîne de production basée sur l'impression 3D

La figure 11 représente ainsi le passage d'une chaîne de production traditionnelle à une chaîne basée sur l'impression 3D, dans une version très simplifiée qui serait composée de produits à 100 % fait d'impression 3D, basée sur une production à la demande et sans inventaire. Dans la réalité de la fabrication additive, il en est autrement, car des enjeux complexes en matière de gestion des matières premières, des stocks et d'approvisionnement s'interposent dans le processus. Mais la chaîne de

production n'en est pas moins simplifiée si l'organisation intègre les nouveaux processus de production à son modèle d'affaires.

La simplification par numérisation des procédés de fabrication, la diminution de l'utilisation des matières premières de l'impression (malgré le coût plus important de ces matières premières), la rapidité de production ou encore les nouvelles formes d'organisations spatio-temporelles permises par l'impression 3D, sont à l'origine de cette transformation (cf. la partie 5).

Même si l'impression 3D permet cette simplification des chaînes de production, elle vient par là même concurrencer les systèmes de production traditionnels. Il est ainsi primordial de nuancer cette transformation. En effet, pour le moment, elle n'est effective que dans des industries spécialisées, de petites tailles, sujettes aux changements, et ayant adapté leurs pratiques d'affaires à l'image des entreprises spécialisées dans la fabrication de prothèses dentaires sur mesure, par exemple. En effet, les avancées technologiques actuelles et les coûts associés ne permettent pas de concurrencer ces industries classiques. Nous développerons sur les conditions de ces limites de l'impression 3D dans la partie 3.4.1.

b) Rapidité de la chaîne de production

L'impression 3D permet de diminuer fortement les temps de production en envisageant de nouveaux cycles de production adaptés aux attentes et besoins spécifiques des consommateurs, via notamment :

- Le développement de procédés d'impression agiles : Les procédés de fabrication de l'impression 3D n'ont pas besoin d'adapter ou de modifier constamment leurs lignes de production et de développer des outils à usages spécifiques. Autrement dit, des machines dites «agiles» sont capables de s'adapter à des milieux différents, et permettent ainsi de diminuer les temps de production.
- La diminution des étapes de production : C'est en s'affranchissant de nombreuses étapes de production (préparatoires et post production), ainsi que de certaines étapes intermédiaires que l'impression 3D est capable de produire plus rapidement. En imprimant de façon quasi instantanée un objet conçu numériquement, le cycle de production est considérablement raccourci.
- La diminution du temps de fabrication : Même si les procédés d'impression 3D restent assez lents — à la pièce (cf. partie 2.1) il n'en est rien comparativement au cycle nécessaire pour produire cette même pièce selon les procédés traditionnels (exemple : utilisation de moules, production ou usinage de pièce, traitement de la pièce et postproduction).

Ainsi, on se trouve dans une situation paradoxale : le procédé d'impression 3D pour imprimer un objet peut être relativement long, mais dans la chaîne de production, le processus (cycle de production) dans son ensemble est plus rapide.

Il en résulte un procédé d'une grande vitesse notamment pour des plus petites séries ou des objets personnalisés. Ainsi, cette rapidité de production — diminution du cycle conception/fabrication, conjuguée à la transformation de la chaîne de production et la forte teneur numérique, permet la création de nouveaux modèles d'affaires basés sur la personnalisation — de masse (cf. partie 4.5).

c) Proximité de la production

L'impression 3D, associée à la chaîne numérique, remet en cause le modèle dominant pour la conception de chaînes de production, consistant à les délocaliser à l'étranger afin de réduire les coûts associés à la fabrication de pièces en série, notamment par des coûts de main-d'œuvre plus faible. L'apparition des procédés et des processus liés à la fabrication additive permet de créer des chaînes de production et d'assemblage de proximité, où une partie de la valeur est associée à la vitesse de transformation de ces dernières, et à leur grande souplesse et modularité.

Face à des imprimantes 3D capables de fabriquer des pièces de plus en plus complexes (encore en faible quantité en comparaison aux chaînes de fabrication en série), les économies — en termes de logistique ou d'échelle — se basant sur des chaînes d'assemblage centralisées ne sont plus aussi favorisées. En effet, malgré un débit réduit et des technologies encore très onéreuses, la fabrication additive semble être graduellement privilégiée par les petites et moyennes entreprises qui osent relever le défi de l'innovation. Surtout lorsque cette démarche s'inscrit dans une stratégie de personnalisation de produits. En termes de temps de transport et de coûts associés aux marchandises produites à l'étranger selon des modes de production traditionnels, la fabrication additive d'objets complexes et modulables devient de plus en plus avantageuse (voir la section 3.3.1.b).

Cette évolution du caractère spatio-temporel de la production additive ouvre la voie à de nouvelles possibilités. Elle permet de reconceptualiser, de réanalyser et/ou de relocaliser les ressources et les moyens de production, avec notamment le développement de nouvelles chaînes de valeur localisées à l'échelle de la ville et/ou plus largement de la région ou du pays.

Dans ces conditions, on voit émerger depuis quelques années des entreprises qui relocalisent leur chaîne de production. Grâce à l'impression 3D, «la répartition de la totalité ou d'une partie de la production à une échelle plus régionale voir même locale devient économiquement faisable» (Wohlers, 2016).

C'est dans cette logique de relocalisation de la production, associée à un désir grandissant de développer des objets hyper personnalisés, que l'on voit se développer de nouveaux types de structures telles que les Fablabs (cf. partie 5.2).

d) Obsolescence des produits

La fabrication additive permet aussi de reconsidérer le concept de l'obsolescence (programmée) des produits. En effet, en favorisant la

fabrication de pièces de rechange accessibles et personnalisables, il devient possible de développer et d'implanter des installations de production sur des sites à proximité des marchés d'utilisateurs. Ce faisant, cela réduit les coûts de transport et permet de réaliser de véritables économies pour les utilisateurs et ainsi limiter les entreposages (Wohlers, 2016).

Par exemple, produisant localement, la valeur du produit n'est plus nécessairement dans ce dernier, mais dans le service associé, y compris le service d'entretien ou de vente de pièce détachée pour une réparation. Ce qui amène les organisations à transformer leurs modèles d'affaires.

3.4 Transformation des modèles d'affaires

Les changements organisationnels engendrés par l'impression 3D provoquent ainsi des transformations de la chaîne de valeur. Celle-ci demeure cependant fragmentée à l'échelle mondiale. De par la diversité de ses pratiques et de ses applications, la fabrication additive présente de nombreux potentiels ouvrant à de nouveaux modèles d'affaires. En modifiant la chaîne de valeur et la chaîne de production, de nouveaux possibles s'ouvrent aux entreprises. Le rapport d'ISDE (2016) identifie certaines de ces pistes, que ce soit en termes de collaboration ou de développement technologique :

- La production à petite échelle de produits personnalisés, permise notamment par la facilité à concevoir des moules par injection ;
- La facilité d'accès à des logiciels de conception 3D assistée par ordinateur (CAO), qui permettent de nouvelles caractéristiques de conception (voir partie 2.3.1) ainsi que de limiter les pertes de matériaux (voir partie 2.3.2);
- L'utilisation de nouveaux matériaux qui permettent de répondre à de nouveaux besoins (voir partie 2.2.4), tels que les matériaux évolutifs, ou encore les biomatériaux.

Les enjeux présentés ci-dessus (normalisation, nouvelles formes organisationnelles, transformation des chaînes de production et de valeur) associés aux transformations économiques et sociales, discutées plus loin dans les parties 4 et 5, permettent aux entreprises la création de nouveaux modèles d'affaires, notamment avec des stratégies basées sur la production à la demande, la personnalisation des produits, la recomposition de la chaîne de valeur, la relocalisation des activités, etc. Ces conditions ouvrent la voie à de nouveaux marchés. Par exemple, dans le domaine de la santé, la fabrication de prothèses personnalisées (voir notamment la partie 4).

3.5 Défis et limites

L'impression 3D n'est donc pas adaptée à toutes les situations, comme la production de masse d'objets simples. Toutefois, même dans des secteurs où elle gagnerait à être utilisée en tirant profit des avantages technologiques et organisationnels permis, beaucoup d'entreprises ne sont pas encore prêtes à délaisser les procédés de fabrication traditionnels.

Cette lenteur dans le changement organisationnel se traduit notamment dans les secteurs qui produisent des pièces métalliques. Les machines-outils sont onéreuses — il faut compter plusieurs millions de dollars pour une imprimante à frittage laser — leurs logiciels de contrôle sont extrêmement complexes à maîtriser, et permettent peu de transfert d'une technologie à une autre. Il faut également souligner la nécessité pour les entreprises d'amortir le coût de ces infrastructures avant de pouvoir opérer cette transition.

«Les systèmes de fabrication additive nécessiteraient une augmentation de la rapidité (de production) d'un facteur de 10 à 20, voire plus, avant d'offrir une rentabilité pour la plupart des pièces. La fiabilité du traitement des métaux doit elle aussi être améliorée par l'entremise de la modélisation par ordinateur» (ISDE, 2016, p. 5).

Un tel changement pourrait prendre une dizaine d'années avant d'être envisageable auprès des industries.

La lenteur des procédés de fabrication additive, la complexité des logiciels ou encore le coût des matériaux — les poudres de métaux sont jusqu'à 30 fois plus chères (en poids) que l'équivalent de matière brute (Bouffaron, 2014) — ne sont pas l'unique raison de la lenteur de ces changements organisationnels.

En effet, une composante socio-économique est à prendre en considération, car l'intégration de l'impression 3D dans les processus traditionnels de fabrication n'en est qu'à ses débuts. Considérer les approches hybrides qui associent impression 3D et processus traditionnels de fabrication permettrait aux industries d'effectuer cette transition socio-économique, afin d'adopter des changements organisationnels en suivant une transition progressive.

Les entreprises manquent également de capacité innovante due à l'enracinement dans les routines organisationnelles, cognitives et stratégiques existantes. Ainsi, l'une des limites majeures est reliée aux connaissances touchant l'impression 3D. Connaissances techniques, certes, mais également connaissances socio-organisationnelles. On l'a vu, l'adoption de l'impression 3D engendre un grand nombre de transformations, pour lesquelles les entreprises canadiennes ne sont pas encore prêtes.

Cela pose la question de la formation. En effet, la complexité des logiciels et des procédés d'impression requiert 1) une formation technique, qui de manière générale, n'est pas en corrélation avec le savoir-faire des employés ; 2) une formation sur les nouveaux modes d'organisation et de relation au travail pour rendre efficace l'adoption de l'impression 3D. Dit autrement, l'adoption de l'impression 3D et de la chaîne numérique sans repenser sa chaîne de valeur, sa chaîne de production et ses modes d'organisation et son modèle d'affaires ne donnera probablement que des résultats marginaux. Mais revoir ces différents éléments nécessite des connaissances allant bien au-delà des connaissances techniques habituellement mises de l'avant.

Résumé

- Plusieurs groupes travaillent à la normalisation ISO de l'impression 3D afin de simplifier son adoption par les organisations. Avec l'impression 3D, on passe de la consommation de masse à la personnalisation de masse à travers une transformation de la notion de normalisation.
- L'impression 3D favorise l'adoption de pratiques organisationnelles propres au numérique, telle une augmentation et simplification des collaborations, un aplanissement des structures organisationnelles, une meilleure diffusion des connaissances interorganisationnelles.
- L'impression 3D redéfinit la chaîne de production, en l'allégeant tant en amont (conception) qu'en aval (production, lien avec l'utilisateur). Elle contribue à la transformation des compétences des créateurs et des producteurs. Elle permet la multiplication des cycles de prototypage rapide, permettant de se centrer plus facilement sur les enjeux d'usages, créateurs de sens et de valeur. En termes de production, elle permet l'économie (nouvel usage) de matière, la suppression d'étapes devenues superflues résultant en gain de temps important, l'optimisation de formes, de poids, de taille et de performance des objets (hyper optimisation — géométrique, structurelle et formelle).
- De nouvelles chaînes d'approvisionnement sont alors possibles et s'organisent, permettant une reterritorialisation (possiblement en grappe et en réseau) de l'industrie, sous une forme beaucoup plus agile. On assiste ainsi à l'émergence de nouveaux modèles d'affaires embryonnaires.
- Les connaissances manquantes autour de l'impression 3D sont plutôt de nature socio-organisationnelles que techniques.

Abstract

- For the purpose of simplifying the adoption of 3D printing by organizations, several groups are working on an ISO standardization. 3D printing allows the passage from mass consumption to mass personalization through the transformation of the standardization notion.
- 3D printing enables the adoption of specific, digital, organizational practices such as simplified and increased collaborations, organizational structures leveling as well as a better dissemination of cross-organizational knowledge.
- 3D printing redefines the production chain by alleviating it both upstream (conception) and downstream (production, user connection); it contributes to the skills transformation of creators and producers. It allows the multiplication of rapid prototyping cycles making it easier to concentrate on the creation of meaningful and valuable uses. In terms of production, it provides saving on materials (new uses), suppression of rendered superfluous steps resulting in considerable time saving, optimization of forms, weight and size as well as objects performance (extreme optimization – geometrical, structural, formal).
- New supply chains are now possible and their organization is allowing a reterritorialization of industry (possibly in clusters and networks) in a more agile form. Thus, we can witness the emergence of new embryonic business models.
- Lack of knowledge about 3D printing is rather socio-organizational than technical.

Impression 3D et transformations économiques

Partie 4. Impression 3D et transformations économiques

De la même façon que l'impression 3D produit des impacts directs et indirects sur les organisations, elle contribue à la transformation de l'économie. Après un état des lieux de l'économie de l'impression 3D, on étudiera les transformations s'inscrivant dans une perspective schumpetérienne de destruction créatrice². La chaîne numérique et l'impression 3D contribuent à des dynamiques territoriales et mondiales nouvelles. On examinera également l'impact dans plusieurs secteurs économiques.

4.1 État des lieux économique de l'impression 3D

Telle que présentée précédemment, la fabrication additive est une méthode précieuse de prototypage rapide associée à la création numérique et un système efficace de production permettant complexité, précision et faibles délais. C'est grâce à ces caractéristiques qu'un nouvel écosystème économique dont les limites sont encore à définir se développe.

À l'heure actuelle, les efforts de R&D consacrés au développement et à la conception de produits représentent 5 à 10%, les 90 à 95% restants étant consacrés à la production desdits produits (Wohlers, 2016). Face à ce constat, les industriels cherchent des alternatives pour réduire leurs temps de production. C'est ainsi qu'en 2015, les ventes de systèmes industriels traditionnels (machines de 5 000 \$ et plus) ont baissé de 2,2%, au profit des systèmes d'impression, entre autres.

Au même moment, l'industrie de la fabrication additive - services et produits directement associés à la fabrication additive - représentait 5,165 milliards USD au niveau mondial. Il est important de faire cette distinction entre services et produits associés à la fabrication additive. Ainsi, les produits sont à rapporter à l'ensemble des ventes de produits associées à l'impression 3D, que ce soit en termes de machines, composants, matériaux, etc. Leur recette s'élevait à 2,365 milliards USD en 2015. Les services correspondent quant à eux à une offre proposée par les professionnels de l'impression 3D que ce soit en termes de modélisation avant impression, de fabrication, de veille technologique ou encore de vente en ligne d'objets imprimés en 3D. Bien que la vente des produits de la fabrication additive génère une importante recette, les services

² Pour simplifier ce processus, Schumpeter décrit l'économie capitaliste comme une succession dynamique de petites entreprises innovantes grossissant pour devenir d'importantes entreprises, éventuellement en position de monopole ou d'oligopole, entraînant une rigidification des choix ayant mené au succès, donc perdant leurs capacités innovantes. Cette nouvelle grosse entreprise en position dominante innove alors peu. Jusqu'à ce qu'une nouvelle autre petite entreprise innovante arrive alors avec une nouvelle proposition transformant l'environnement et/ou le modèle d'affaires préexistant. Pris dans des enjeux politiques internes, des routines organisationnelles, etc., la grosse entreprise se croyant à l'abri de par sa taille voit la petite entreprise devenir grande. Et le cycle continu. On citera comme exemple dans le secteur informatique IBM dont la place d'acteur dominant a été prise par Microsoft dans les années 80. Dominant dans les années 2000, Microsoft s'est alors fait voler sa position par Google, etc.

représentaient quant à eux plus de la moitié des recettes associées à la fabrication additive en 2015, soit près de 2,8 milliards USD (Wohlers, 2016).

D'après les prévisions du Wohlers (2016), l'industrie de l'impression 3D en 2021 pourrait atteindre une valeur de 26,5 milliards USD. Cette évolution devrait toucher dans un premier temps les milieux aérospatial, médical, dentaire et l'orfèvrerie, pour ensuite toucher le monde de l'automobile (Wohlers, 2016).

Bien que la majeure partie des ventes réalisées par la fabrication additive soit destinée au monde professionnel, et en particulier à l'industrie du métal, les ventes de machines de bureau sont en augmentation constante depuis les quatre dernières années. Wohlers Associates définit une machine de bureau comme un système de fabrication additive dont le prix n'excède pas 5000 USD, c'est notamment le cas des machines RepRap, Makerbot ou encore Ultimaker. C'est ainsi qu'entre 2012 et 2015, les ventes de machines de bureau sont passées de 35 708 à 278 385 unités. En 2015, elles représentaient un total de 293,6 millions USD. (Wohlers, 2016)

Si les systèmes de fabrication additive représentent la majeure partie des recettes, les matériaux utilisés comme matière première par l'impression 3D représentent une part non négligeable de cette industrie de la fabrication additive. C'est ainsi qu'en 2015, les ventes de matériaux destinés à l'industrie professionnelle et aux imprimantes de bureau s'élevaient à 768,5 millions USD. Ces ventes comprenaient l'ensemble des matériaux utilisés par la fabrication additive, que ce soit les photopolymères (45,5%), les poudres (24,9%) ou encore les métaux (11,5%).

Les États-Unis représentent la part la plus importante du marché de la fabrication additive, depuis 1988 jusqu'à 2015. Ils ont vendu 50,6 % des systèmes de fabrication additive. Suivent de près l'Israël et des pays européens, en particulier l'Allemagne et la France. Ensemble, ils représentent plus de 90% du marché, tel que l'illustre la figure 12.

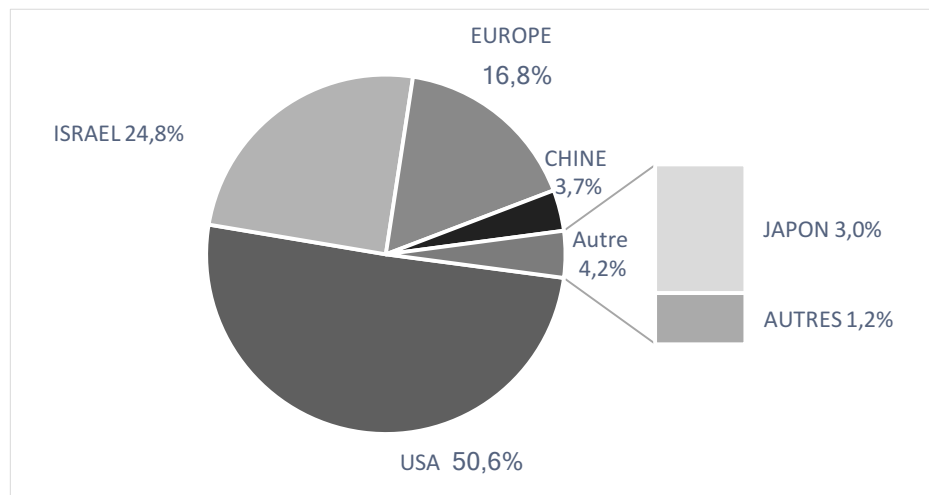


Figure 12 : Représentation des ventes de l'industrie de la fabrication additive entre 1988 et 2015 dans le monde (©Wohlers, 2016)

Les leaders du marché mondial de la fabrication additive sont donc logiquement des compagnies américaines présentes sur le marché depuis la fin des années 1990. Les entreprises Stratasys, 3D Systems et Envisiontec représentent à elles seules plus des deux tiers du marché (voir la figure 13).

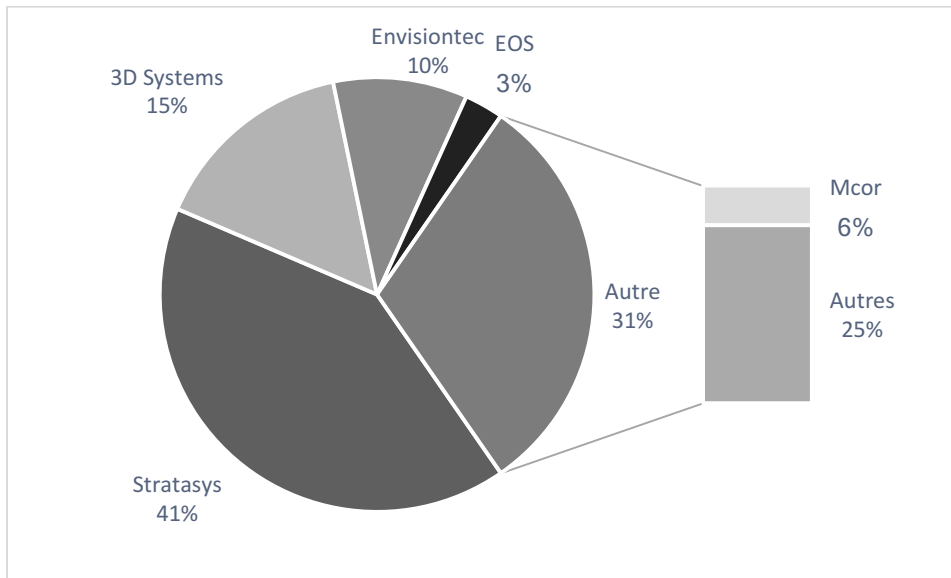


Figure 13 : Part de marché des plus grandes entreprises de fabrication additive dans le monde (©Wohlers, 2016)

Que ce soit un simple utilisateur en possession d'une imprimante de bureau ou une entreprise spécialisée dans le service et l'impression 3D, la fabrication additive permet aujourd'hui de mettre en vente ses services, notamment au travers des circuits traditionnels de distribution, ou via des plateformes numériques de service d'impression 3D.

4.2 Acteurs économiques au Canada

L'expertise et le développement économique du Canada en matière de fabrication additive ne cessent de se développer depuis 2015, notamment grâce à la collaboration du gouvernement fédéral et des gouvernements provinciaux qui soutiennent financièrement les chercheurs et les entreprises porteurs d'innovation, qui assurent la prospérité et le rayonnement du Canada à l'échelle internationale. Malheureusement, le Canada part de loin en la matière, et un important travail de mise à niveau est nécessaire. C'est ainsi qu'en 2015, 1,9% des systèmes de productions industrielles au Canada étaient destinés à la fabrication additive (Wohlers, 2016).

De nombreux programmes de soutien et centres de recherche développent des initiatives dans le domaine de la fabrication additive au Canada, c'est notamment le cas du Conseil national de la recherche (CNRC), du Centre de recherche industriel du Québec (CRIQ) notamment à travers son laboratoire sur les métaux et la fabrication additive qui mène des recherches et fournit des conseils aux industriels. Ceci, entre autres choses, sur les questions d'optimisation de la conception, d'optimisation de la chaîne de valeur et de production de courtes séries.

De nombreux acteurs économiques de la fabrication additive au Canada, et plus particulièrement au Québec, sont regroupés au sein du réseau Canada Makes : un réseau d'entités privées, publiques, universitaires et à but non lucratif qui se consacrent à promouvoir l'adoption et le développement de la fabrication additive ; ou encore le réseau Québec-3D (RQ3D) composé de professionnels touchant à la fabrication additive.

Toujours en termes d'expertise, le Canada compte aujourd'hui cinq experts techniques présents au sein de six groupes de travail de la norme ISO / TC 261.

La fabrication additive au Québec est elle aussi en plein développement. Majoritairement consacrées à la vente de service en impression 3D, les entreprises québécoises, pour la plupart basées en région de Montréal, possèdent des effectifs réduits (67,9%) allant de 1 à 10 personnes tel que présenté sur la figure 14 (Da Silva et Blum, 2016).

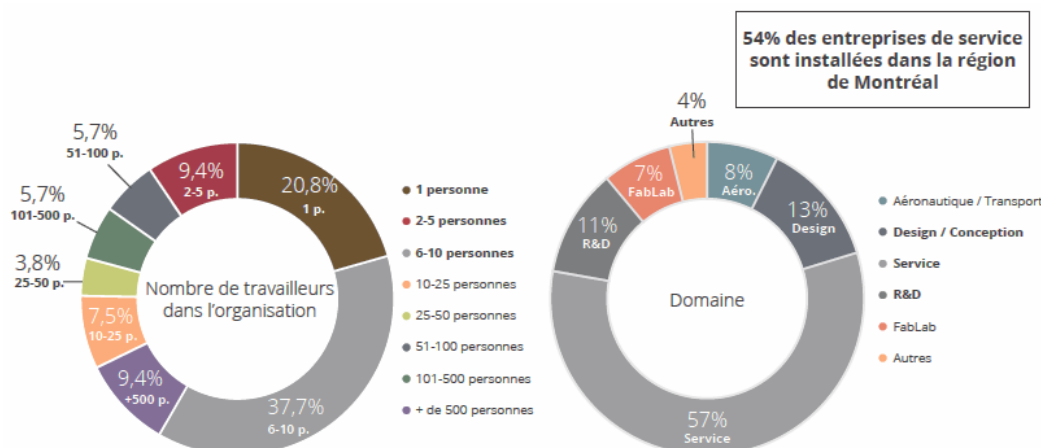


Figure 14 : Représentation des entreprises de fabrication additive au Québec en fonction de leur taille et de leur domaine d'intervention (Da Silva et Blum, 2016)

4.3 Modèles économiques et *open source*

Le mouvement *open source* est né dans le domaine du logiciel. Issu du logiciel libre dont les tenants cherchent les quatre libertés d'usage, d'étude, de partage et de contribution (FSF, 2004), le mouvement de l'*open source* s'en est dissocié en focalisant non sur les dimensions politique et communautaire du projet, mais sur ses propriétés en matière d'efficacité reliée au partage du code (Raymond, 1998). En effet, le code étant immatériel, il en possède les propriétés : 1) non excluable, il est difficile de le contrôler et d'en exclure des usagers ; 2) non rival, il peut appartenir à plusieurs personnes en même temps sans que cela n'amène de préjudice à quiconque ; 3) cumulatif, il se construit et devient plus complexe, robuste, effectif, par la somme de ses contributions. À partir de ces propriétés, le partage sur la base d'une propriété intellectuelle collective plutôt qu'individuelle, inclusive plutôt qu'exclusive lui permet de ne pas créer de barrières artificielles en transformant les règles économiques. D'où la capacité à développer des logiciels ayant une très importante valeur, à des coûts très faibles. Il est toutefois impossible de

vraiment différencier les deux objectifs du logiciel libre (objectif politique et communautaire) de celui de l'*open source* (objectif d'efficacité), les deux étant la plupart du temps enracinés dans la même entité technique.

Ce mode d'organisation est particulièrement efficace, et s'est peu à peu étendu au-delà du logiciel. Avec la création des licences *creative commons*³, il s'est prolongé aux domaines de l'information et du savoir. L'une des premières initiatives visible et couronnée de succès reposant sur de tels principes est le développement de l'encyclopédie Wikipédia.

Ainsi, en « dématérialisant » en partie la production (voir la section 3.3), soit en augmentant la quantité de travail liée à la conception au détriment de la fabrication, l'impression 3D contribue à inscrire la production de biens dans l'économie numérique, et donc à en augmenter le volume d'informations et de connaissances. Il devient alors plus facilement transposable d'inscrire la fabrication dans des pratiques *open sources* ayant démontré leur efficacité.

Il existe ainsi plusieurs plateformes web permettant l'échange et le partage de fichiers d'objets sous licences libres. Ces fichiers peuvent être alors utilisés tels quels, ou au besoin modifiés et redistribués dans leur version potentiellement améliorée. Ces plateformes d'échanges sont également souvent le lieu d'échange de bonnes pratiques sur l'utilisation des imprimantes et des logiciels. Ces modalités d'échange et de partage augmentent la portée et l'accès à l'usage de l'impression 3D. Elles nécessitent toutefois une approche différente du modèle classique des organisations et nécessitent pour être utilisées efficacement un changement des pratiques de collaboration (cf. la section 3.2).

Toutefois, comme dans le logiciel libre, le mode d'organisation efficace et les objectifs communautaire et politique de liberté sont difficilement dissociables. L'utilisation de telles pratiques entraîne donc dans son sillage une conception différente des modes d'organisation sociaux, ce qui sera notamment traité dans la partie 5.

Ces formes d'organisations nouvelles entraînent une modification de la structure économique. En favorisant la collaboration, elle tend à renforcer les grappes technologiques et l'organisation d'entreprise en *clusters*, au sein desquels la capacité à développer un haut niveau de savoir dans un secteur spécifique est primordiale au développement des entreprises.

³ Les licences *creative commons* proposent « des contrats-type ou licences pour la mise à disposition d'œuvres en ligne. Inspirés par les licences libres, les mouvements *open source* et *open access*, ces licences facilitent l'utilisation d'œuvres (textes, photos, musique, sites web, etc). »

Source : <http://creativecommons.fr/licences/>. Ainsi, le contenu de Wikipedia est sous licence Creative Commons BY-SA 3.0

4.3.1 Un exemple : DIY drones and open source

L'exemple des drones illustre bien cette dynamique de l'open source. En effet, en permettant aux *makers* désireux de fabriquer leur propre drone, de concevoir eux-mêmes la géométrie du châssis et d'imprimer des pièces détachées en cas de casse, l'impression 3D représente ici un véritable atout. Ces *makers* ont souvent recours à des plateformes collaboratives en *open source* telles que Instructable. Ils y partagent leurs idées et réalisations auprès de communautés de la fabrication additive sous la forme de tutoriels par exemple. Ces outils de collaboration (cf. la section 3.2.1) permettent ainsi de créer une synergie au sein de la communauté, en favorisant les reproductions et les modifications-améliorations des fichiers sources (innovation incrémentale).

Dans une autre forme de démocratisation (*empowerment*) des objets conçus par l'impression 3D, les *makers* peuvent parfois jouer le rôle de *hackers*, usant des pratiques du DIY (*Do It Yourself*) afin de reproduire des produits commercialisés par des grandes compagnies. C'est notamment le cas de l'entreprise DJI qui a récemment commercialisé le drone semi-professionnel Phantom 4, le plus avancé technologiquement du marché.

Dans la foulée, soit quelques semaines plus tard apparaissaient les premières copies de ce drone, auxquelles de nombreux hackers se sont empressés d'apporter leur contribution en développant de nouveaux accessoires.

Face à ce désir de personnalisation provenant des *makers*, certaines entreprises développent des drones partiellement imprimés en 3D. C'est le cas de NanoRacing, spécialisée dans le développement de drones de course, qui propose un drone dont la partie centrale (figure 15) est entièrement imprimée en 3D (nylon de type PA 33). Ce mode de production permet à l'entreprise d'avoir un système de production assez souple et aux usagers de réparer leur drone grâce à l'impression 3D sans avoir à passer par le cycle traditionnel de commande de pièce.

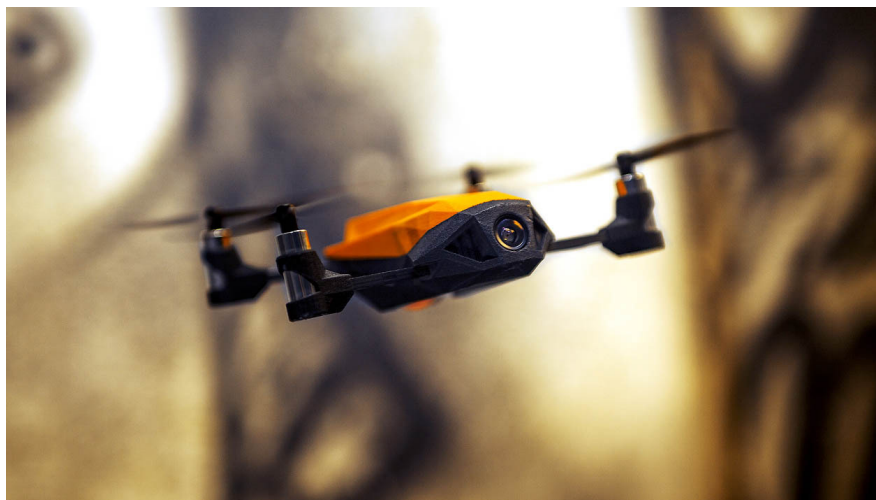


Figure 15 : Nano Racer et sa partie centrale imprimée en 3D
(© Nano, 2016)

4.4 Impression 3D et personnalisation de masse

Deux phénomènes liés à l'impression 3D convergent vers une forme économique de personnalisation de masse, succédant et s'inscrivant dans la continuité des formes de production et de consommation de masse.

1) D'un côté, le fait de travailler sur une chaîne numérique permet à un industriel de développer des produits et des offres de services afin d'adapter un produit aux besoins et attentes spécifiques d'un consommateur, sans changer sa chaîne de production numérique. Comme vu dans la partie 3, si ces modes de personnalisation sont aujourd'hui possibles d'un point de vue technique, ils ne sont pas encore intégrés dans les modes d'organisation et les stratégies des entreprises.

2) Par ailleurs, la diffusion des techniques de production et la plus large diffusion de l'impression 3D auprès du grand public permettent aujourd'hui de répondre à des besoins grandissants de personnalisation des produits.

Cette personnalisation, bien que répandue à une petite échelle, est notamment permise par la facilité d'accès à l'information et aux logiciels de conception 3D assistée par ordinateur (CAO), le faible coût des matériaux destinés au grand public, et l'amélioration des techniques de numérisation 3D.

Le marché de la personnalisation est investi par des entreprises qui conçoivent des objets sur mesure pour les particuliers et les professionnels. Que ce soit des coques de téléphone, des bijoux ou encore des figurines 3D personnalisées, l'impression 3D d'objets sur mesure ne cesse de se répandre à l'échelle internationale.

Ainsi, l'entreprise Ultimate-Ears, spécialiste des solutions auditives pour les professionnels de la musique a commencé à commercialiser des écouteurs Bluetooth intra-auriculaires sur-mesure imprimés en 3D. Les usagers réalisent une numérisation 3D de leurs oreilles en boutique et reçoivent un système audio sur mesure une dizaine de jours plus tard. Cette offre permet à l'utilisateur de gagner en confort sur la durée d'utilisation, sur le maintien en place de l'écouteur, mais aussi en isolation phonique. La marque met de l'avant la notoriété des équipements auprès de grandes personnalités, et l'adaptation de ses produits aux caractéristiques physiques qui sont propres à chacun.

Face à ce marché de niche, les grandes lignes d'assemblage ne sont pas prêtes à laisser leur place à des usines capables d'imprimer en 3D de grands volumes de production. La faute incombe à des temps de fabrication encore trop longs, des études sur les matériaux utiles à l'impression 3D encore trop peu nombreuses et un véritable manque de formation des techniciens et ingénieurs (cf. la section 5.5).

Bien qu'ambivalentes, la personnalisation et la production de masse tendent malgré tout à se développer dans certains milieux, c'est notamment le cas des dispositifs de santé sur mesure, de l'aéronautique et de l'automobile. Cependant, les coûts associés à ce type de production restent très élevés et encore trop peu normalisés (voir notamment la section 3.1.1).

4.5 Distribution géographique des emplois et reterritorialisation

En simplifiant le processus de production de pièces, l'impression 3D a un impact sur la quantité de travail à intégrer dans l'objet produit. Il en diminue le volume, ou plutôt, il en augmente la quantité en amont (lors de la conception) et en diminue la quantité en aval lors de la fabrication.

Ce déplacement du travail a un impact sur la répartition des emplois. Ceux liés à la conception sont typiquement à plus haute valeur ajoutée, avec des salaires plus élevés, et présent au sein d'économies plus avancées, comme au Canada.

De plus, en diminuant la quantité de travail lié à la fabrication de l'objet produit, l'impression 3D procure du coup un des avantages associé aux pays en voie de développement, soit celui lié au faible coût de la main-d'œuvre. Avec les procédés traditionnels, nombre d'entreprises choisissent de délocaliser leur production de manière à diminuer les coûts de main-d'œuvre. Avec l'impression 3D, cette part de coût tend à diminuer. Il devient donc relativement moins intéressant de produire à l'étranger. Ceci d'autant plus si l'on prend en compte les autres désavantages : coût plus important de la chaîne d'approvisionnement, coût de complexité, risque de variation du taux de change, coût environnemental, délai de livraison, risque de perte ou de fuite de savoirs, risque géopolitique, atteinte à l'image de marque. Ce faisant, il devient plus intéressant pour une organisation de réintégrer sa chaîne de production dans les pays consommateurs.

On peut ainsi considérer que l'impression 3D et la chaîne numérique de fabrication contribuent à un mouvement économique de reterritorialisation, dont on observe déjà la dynamique.

4.6 Impacts selon les secteurs d'activités économiques

Les changements produits par l'impression 3D ne se font pas à la même vitesse et de la même façon selon les différents secteurs d'activités économiques. Dans cette section, on précisera certains des impacts reliés aux secteurs suivants : aéronautique et aérospatial ; architecture et construction ; design et joaillerie ; art ; médical et dentaire.

4.6.1 Aéronautique & aérospatial

Les chaînes de production de l'aéronautique généralement de petites ou de moyennes tailles constituent un cadre propice au développement de l'impression 3D. D'après Rosenberg & al (2015) :

« la supply chain (chaîne de production) de pièces détachées sur des matériels dont la fabrication a été arrêtée depuis longtemps (parfois il y a 20 ou 30 ans) est probablement un des axes de développement de la fabrication additive. La réalisation de pièces multifonctionnelles à très haute valeur ajoutée en est un autre ».

La fabrication additive permet de développer des pièces complexes (voir par exemple la figure 16) selon la fonctionnalité souhaitée en s'affranchissant d'une partie des contraintes des méthodes traditionnelles d'usinage (fabricabilité). Produites la plupart du temps en métal, ces pièces doivent être capables de résister aux fortes pressions et présenter un poids optimisé afin de répondre aux exigences d'économie de carburant. La fabrication additive permet de répondre à ces contraintes et offre ainsi des pistes de développement très intéressantes. En permettant de repenser la manière dont ces pièces sont conçues de même que de développer de nouveaux processus de conception dans le secteur aéronautique et aérospatial.



Figure 16 : Composant aérospatial complexe imprimé sur sa face interne et externe grâce à la fabrication additive (©Burloak Technologies and FMA Communications Canada, 2015)

Ainsi, la production de pièces par fabrication additive permet de répondre aux attentes d'un secteur cherchant fiabilité, baisse de coût et satisfaction de contraintes environnementales (Blum, 2014).

Cependant, à ce jour, seules les modélisations virtuelles ou la fabrication à petite échelle en laboratoire permettent de tester ces équipements imprimés en 3D aujourd'hui. Pour Seigne (2016), deux limites posent aujourd'hui problème en aéronautique, soit : (1) les normes strictes et peu

adaptées à la fabrication additive (aussi, il conviendrait d'adapter ces normes à cette technologie), et ; (2) les finitions de surface du produit imprimé sont parfois compliquées et coûteuses à réaliser sur des formes complexes.

4.6.2 Architecture & construction

La fabrication additive est aujourd'hui de plus en plus répandue au sein des domaines de l'architecture et de la construction. De plus en plus utilisée à des fins de maquettage, les transformations techniques et économiques engendrées par l'impression 3D ne sont pas toujours acceptées auprès d'une profession habituée à des modes de fabrication plus traditionnels.

Dans le monde de l'architecture, la maquette joue véritablement le rôle d'outil de communication, de facilitation des échanges avec le client et les parties prenantes à des fins de transaction ou de validation des commandes. C'est ainsi que le maquettage rapide permis par l'impression 3D transforme déjà la pratique de la profession. En développant des

maquettes plus rapidement, avec des matériaux plus solides, l'impression 3D permet aux entreprises du secteur de développer leur créativité et leur rendement, afin de créer plus de maquettes aux formes complexes, et ce, en moins de temps et à moindre coût.

La fabrication additive permet également de développer de nouveaux types de construction, via notamment le développement de nouveaux procédés d'impression. Même si la construction a généralement recours à des processus d'addition de matière, les innovations dans ce domaine permettent aux concepteurs d'envisager de nouvelles formes et possibilités constructives. C'est notamment le cas de l'ingénieur italien Enrico Dini, qui a mis au point une imprimante 3D à béton, D-Shape, destinée au départ à fabriquer des bâtiments aux formes très simples en 3D.

L'impression 3D permet aujourd'hui de concevoir des ponts en bétons de petite taille (voir la figure 17) ou encore de recréer une barrière de corail le long des côtes, en développant des formes organiques propices au développement de la vie maritime.



Figure 17 : Premier pont piétonnier imprimé en 3D à Madrid par Enrico Dini (© IAAC,2016)

4.6.3 Design et Joaillerie

L'impression 3D se développe auprès des architectes, mais aussi au sein de la communauté du design, que ce soit en termes de design de produits, de design de mobilier ou même de vêtements et chaussures. Elle permet de développer des formes complexes, hybrides, qui ne seraient pas permises par les processus de fabrication traditionnels.

Les designers ont généralement recours à l'impression 3D à des fins de prototypage rapide, leur permettant de tester de nouvelles créations à très petite échelle. Dépendamment de la machine utilisée, les objets conçus numériquement par ordinateur sont reproduits avec plus ou moins de fidélité. Au-delà de cette volonté de développer des prototypes qui

donnent forme à leur créativité, les designers via notamment la simplification des procédés d'impression 3D, sont aujourd'hui capables de développer des microproductions d'objets en édition limitée.

C'est par exemple le cas des objets du quotidien (tables, chaises, lampes et tabourets) développés par Patrick Jouin, qui utilise des procédés tels que le frittage laser ou la stéréolithographie afin de concevoir des pièces hybrides, combinant plastiques et métaux, à l'image de la collection de chaise et tabourets SOLID (voir la figure 18), faite de résine époxy polymérisée par stéréolithographie et frittage de poudre polyamide (nylon), et proposant un design en mouvement, organique, inspiré de « la nature et des brins d'herbe dans un champ ».



Figure 18 : Tabouret et Chaise SOLID conçus par P.Jouin en 2004 (© Designboom, 2016)

La fabrication additive est également adaptée au monde de la bijouterie, en créant des pièces sur mesure d'une grande précision, en petite série et personnalisables. De nombreuses entreprises de joaillerie ont aujourd'hui recours à l'impression à cire perdue ou au frittage laser afin de concevoir des pièces uniques.

À l'image du design, il est important de soulever la question de la propriété intellectuelle et des éventuelles copies permises par l'impression 3D dans le monde de la joaillerie, ainsi que celle de la transmission et la pérennisation d'un savoir-faire ancestrale propre à la joaillerie face à l'apparition de nouvelles techniques de fabrication hybrides (par exemple, céramique, alliage gallium-indium, voir Harrop, 2017).

4.6.4 Art

L'impression 3D est un puissant vecteur de diffusion de l'art. N'importe qui ayant accès à une imprimante 3D peut se procurer une reproduction d'une œuvre ou d'une sculpture et l'imprimer pour son usage personnel.

Avec l'avènement des logiciels de sculpture numérique comme ZBrush ou Meshmixer, un nouveau style artistique est en train d'émerger grâce à l'impression 3D. Des artistes tels que Oliver Van Herpt jouent sur cette

transposition numérique-physique en laissant des imperfections normalement jugées comme une erreur lors d'un processus d'impression 3D.

Au-delà de la création artistique, l'impression 3D joue un véritable rôle dans le domaine de la conservation d'œuvres. C'est par exemple le cas de Morehshin Allahyari, qui reproduit des œuvres détruites par ISIS en 2015 (voir la figure 19), en y incorporant une carte mémoire avec des données photo, vidéo et sonore, afin de montrer que l'impression 3D peut aussi jouer le rôle d'outil de résistance et de documentation afin de montrer que l'impression 3D peut aussi jouer le rôle d'outil de résistance et de documentation.



Figure 19 : *Material Speculation-Lamassu : figurine détruite par ISIS en Irak (©Morehshin Allahyari, 2016)*

Dans cette même volonté de rendre accessible l'art au plus grand nombre, la startup Estudios Durero a développé une méthode de manipulation et de reproduction d'images en relief nommée Didú. Celle-ci combine des outils technologiques, artistiques et pédagogiques permettant de convertir

une image numérique en une image tactile qui produit un sens non seulement pour l'œil, mais aussi pour le toucher, notamment auprès des personnes malvoyantes (voir la figure 20).



Figure 20 : *Reproduction en 3D pour les malvoyants de la peinture de Renoir : Femme avec parasol dans un jardin, de 1875 – Musée Thyssen-Bornemisza – Madrid (© Estudios Durero, 2016)*

Cette contribution de la technologie et de la numérisation rend l'art et la culture plus accessible. Il faut noter que ces œuvres sont reproduites à la main et rendent compte de l'usage de la 3D, mais ne sont pas (encore) imprimées en 3D.

4.6.5. Secteur médical et dentaire

Les secteurs médical et dentaire représentent des domaines où l'impression 3D, de par leur capacité de personnalisation, sont parmi les plus prometteurs, que ce soit par l'impression de produits interagissant avec l'humain du type orthèses, prothèses, plâtre, où qu'il s'agisse de bioimpression. On donnera à titre d'illustration quelques exemples de projets intéressants.

Dans le cadre d'une application médicale, l'impression 3D permet d'offrir de nouvelles opportunités à des personnes qui présentent des malformations (dentaires, osseuses, organiques), des blessures ou encore des brûlures, et ce, en ayant recours à différents biomatériaux : bio-encres, cellules souches, matériaux biocompatibles tels que ceux développés à l'Université d'État de Pennsylvanie.

L'équipe du docteur Ibrahim Tarik Ozbolat expert en médecine régénérative a mis au point un matériau appelé BioInk. Ce matériau permet de recréer du cartilage en combinant du collagène sous forme gélatineuse et du polyéthylène glycol diacrylate. Le matériau d'impression est contenu dans un tube en alginate qui permet la croissance des cellules qui par la suite vont être déposées en filament dans un bain nutritif qui fait office de plateau d'impression. L'un des nombreux avantages de ce procédé c'est qu'il permet de reproduire l'agencement des fibres des ligaments, tendons et cartilages. Encore au stade expérimental, ce procédé permettrait dans le futur de limiter les risques de rejets lors de transplantations, en utilisant des cellules prélevées chez le futur receveur pour les mettre en culture.

À Brisbane en Australie à l'Herston Biofabrication Institute, l'équipe emmenée par la professeure Mia Woodruff a réalisé de grandes avancées en matière d'impression 3D médicale et de prothèses auditives (figure 21). Cette prothèse conçue par l'équipe du Pr. Woodruff est imprimée en 3D à base de cellules souches de cartilage et est pourvue d'un implant qui permet au patient d'entendre normalement. Le laboratoire prévoit d'embaucher prochainement plus de soixante chercheurs et de lever près de 15 millions USD de fonds.



Figure 21 : Prothèse auditive imprimée à base de cellules souches de cartilage par l'équipe du Pr. Woodruff (© Calleja, 2016)

En termes de pratiques *open sources* et médicales (voir partie 5.4), RepBio une branche de la communauté RepRap développe des tissus et des cellules organiques en vue de diffuser ces nouvelles connaissances dans les prochaines années.

4.7 Défis et limites

La fabrication additive a favorisé l'émergence de nouveaux marchés et modèles économiques, notamment en termes de services et de personnalisation de masse. Le développement de l'impression 3D a ainsi permis à de nouveaux acteurs de petite taille, et aux particuliers de s'insérer sur le marché de la fabrication additive, via notamment l'accessibilité des imprimantes 3D de bureau, les contenus *open sources* et les plateformes de vente en ligne.

Les ventes associées à l'impression 3D auprès des particuliers représentent un plus faible retour sur investissement que prévu pour les entreprises fabriquant ces machines. Ces organisations avaient initialement anticipé des ventes importantes, tablant sur un grand nombre de particuliers acquérant ces machines. Le faible chiffre d'affaires a eu pour effet de limiter les financements accordés aux phases de R&D par ces entreprises, et donc l'innovation touchant les imprimantes 3D de bureau.

La redistribution géographique des emplois et la reterritorialisation ont pour effet de bouleverser les chaînes de productions traditionnelles. De plus, des mutations socioprofessionnelles sont notables, c'est notamment le cas des secteurs de l'aéronautique, de l'architecture ou encore du secteur médical.

Cependant, malgré les innovations technologiques importantes qui engendrent ces mutations économiques, l'impression 3D n'est pas encore en mesure de concurrencer, ni sur le point de détrôner les procédés de production traditionnels (voir la section 3.3.2.a).

Il faut finalement mettre en lumière les questions éthiques soulevées par la diffusion d'objets imprimés en 3D comme dans le cas de la fabrication de prothèses sur mesure. Tout comme les industries de pointe (aéronautique et aérospatial), il conviendra de mettre en place des normes spécifiques à chacun des domaines présentés ci-dessus et une législation adaptée à une technologie qui promet de bouleverser les pratiques et le monde de la recherche.

Résumé

- Au niveau économique, la présente étude montre que l'industrie de l'impression 3D est en forte croissance depuis quelques années et devrait se poursuivre pour les années à venir.
- Quelques acteurs économiques clés de l'impression 3D sont présentés.
- Le lien entre modèles *open source* et impression 3D modifie le tissu industriel, avec notamment un impact significatif sur la question de la propriété intellectuelle.
- Cette reconfiguration économique liée à l'impression 3D génère des impacts potentiels importants, telle une possible reterritorialisation s'accompagnant d'une reformulation de la dynamique industrielle, différente de la précédente révolution industrielle. Cette dynamique implique de nouveaux acteurs, de nouveaux modes d'échange nécessitant un passage par la chaîne numérique. Cet ensemble de conditions émergentes et variées crée une nouvelle synergie entre les secteurs manufacturiers et le marché. Ce contexte unique permet de générer de nouvelles activités économiques à valeur ajoutée, suivant des cycles courts susceptibles de s'affranchir d'une partie des obstacles technologiques pour les producteurs. Par exemple, en design et en architecture, les imprimantes 3D (de type personnel) sont aujourd'hui massivement utilisées.
- L'impact de l'impression 3D est présent dans plusieurs secteurs d'activités économiques, notamment le secteur aéronautique, l'architecture et la construction, le design et la joaillerie, l'art, le secteur médical et dentaire. Ainsi, des impacts importants dans les domaines de la santé (prothèses, greffes, reconstruction de tissus humains, etc.) de l'aéronautique (nouvelles formes aérodynamiques, objets plus légers, etc.) redéfinissent les acteurs et les compétences à développer dans ces secteurs de l'économie.

Abstract

- From an economic point of view, the presentation of 3D printing business is completed. For some time now, the 3D printing industry has been growing rapidly and is expected to continue in the years to come.
- Some key economic players in 3d printing are presented
- The link between open source and 3D printing is changing the industrial fabric; there are impacts particularly on intellectual propriety issues.
- This economic reconfiguration associated with 3D printing is potentially creating important impacts such as possible reterritorialization along with the reformulation of the industrial dynamics, unlike the previous industrial revolution. New players and new trading modes are involved in this new dynamic and requires a passage through the digital chain. This set of varied and emerging conditions creates a new synergy between the manufacturing sector and the market. This unique context enables the generation of new value-added economic activities following short cycles capable of freeing itself from parts of the technological barriers that producers encounter. For example, in design and architecture, (personal) 3D printers are now used on a massive scale.
- The 3D printing impacts are present in several economic activity sectors, particularly aeronautics, architecture and construction, design and jewelry, art, medical and dental sectors. Thus, important impacts in healthcare (prostheses, transplants, reconstruction of human tissues, etc.) and aeronautics (new aerodynamic shapes, lighter objects, etc.) are redefining the players and the necessary skills to be mastered within these economic sectors.

Impression 3D et transformation sociétale

Partie 5. Impression 3D : prospectives environnementales et transformations sociétales

L'économie constitue l'infrastructure de la société. Une économie qui progresse représente le symbole d'une société qui prospère. À l'image des transformations économiques (cf. partie 4) engendrées par le développement de la fabrication additive, celle-ci s'intègre et renforce de nouvelles formes de transformations sociétales.

Les influences de l'impression 3D sur les dynamiques sociales et environnementales permettent ainsi d'envisager la conception, la collaboration et le partage des connaissances et des compétences sous un nouveau regard.

5.1 Perspectives environnementales

Les transformations organisationnelles (cf. la partie 3) et économiques présentées ci-dessus permettent de développer de nouvelles perspectives environnementales, via notamment la diminution de l'utilisation de matières premières et de transport grâce au développement de cycles locaux. En cela, l'impression 3D participe au mouvement de transition vers une économie plus durable.

5.1.1 Design optimisé, léger et épuré

La modélisation et l'optimisation (cf. les sections 2.3.1 et 2.3.2) des structures et des formes géométriques conçues permettent un allègement du poids des objets créés et un gain de matière sans pour autant altérer les performances de ces objets. Ces transformations impactent positivement l'empreinte environnementale des produits issus de l'impression 3D.

Le développement et le perfectionnement des processus de fabrication additive permettant l'optimisation des objets conçus (tout en préservant les caractéristiques fonctionnelles) ont également permis aux designers d'envisager de nouvelles esthétiques, plus complexes, légères et épurées.

Cette quasi-absence de limites de fabrication permet ainsi à ces designers de travailler à partir de modèles mathématiques, notamment en ayant accès à des modeleurs paramétriques, qui permettent d'intégrer les mathématiques (complexes) dans la création artistique.

Les avancées technologiques en termes d'impression 3D permettent à certaines compagnies d'investir de nouveaux marchés. C'est notamment le cas des énergies renouvelables et des panneaux solaires. CSIRO et l'université de Melbourne ont ainsi mis au point un procédé capable d'imprimer des cellules photovoltaïques sur un support plastique léger et flexible d'une largeur de 30cm qui produit 10 à 50 W d'électricité par mètre carré (voir la figure 22).

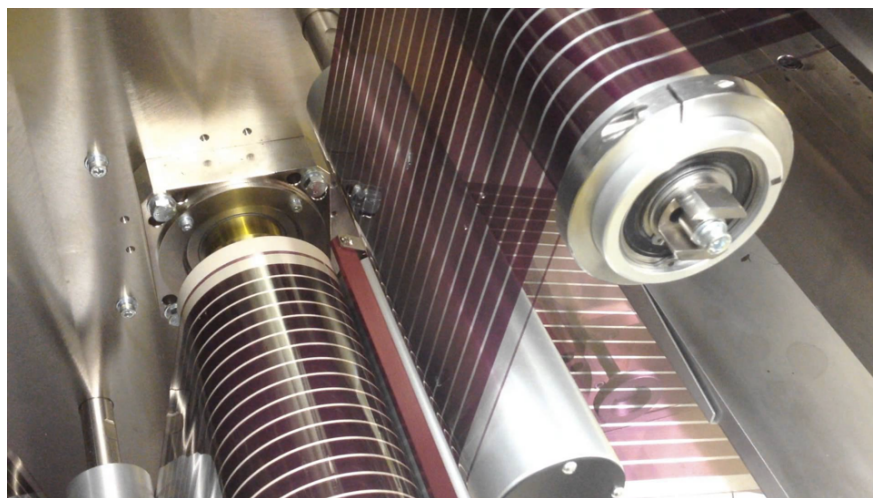


Figure 22 : Cellules photovoltaïques flexibles (© Copyright CSIRO Australia, 2016)

Ces avancées techniques permettent ainsi de limiter l'utilisation de matières premières et les coûts associés à la production de panneaux photovoltaïques traditionnels, mais aussi d'envisager de nouvelles applications pratiques : randonnée, défense, prêt-à-porter.

5.1.2 Conception verte et cycle de vie

La fabrication additive se conjugue très souvent avec une réduction de l'utilisation des ressources, une diminution de l'impact des transports (cf. la section 3.3.2.a), du recyclage, de la réutilisation de matériaux, et une soutenabilité des méthodes d'impression.

C'est dans ce sens que Clément (2016) prône une conception verte et un cycle de vie de l'impression 3D contrôlés notamment à travers le développement d'imprimantes 3D à faible empreinte environnementale, en favorisant l'utilisation de matériaux à faible impact (cf. la section 2.2.1.a) et potentiellement recyclable.

Il est également important de développer des technologies sécuritaires pour les utilisateurs et l'environnement (faibles émissions de substances toxiques). Qui plus est, il convient de documenter et de préciser les impacts de ces utilisations et de ces matériaux sur la santé des consommateurs, et notamment auprès des plus jeunes. Cette information n'est actuellement pas suffisamment mise de l'avant.

Aussi, pour les entreprises qui souhaitent réduire leur empreinte environnementale, l'approche par cycle de vie présente un potentiel intéressant. L'approche permet de considérer un ensemble de facteurs permettant de mettre l'accent sur l'économie de matière, d'énergie, le stockage, les précautions pour prévenir la toxicité, le recyclage ou la réutilisation des produits, etc. En s'étendant à la production de masse et en documentant de façon plus précise ses impacts sociétaux et environnementaux, l'impression 3D présenterait un grand intérêt en

matière de soutenabilité sociale et environnementale. Une soutenabilité dont l'impression 3D ne peut pas encore se prévaloir, malgré son fort potentiel.

Pour Gebler et al. (2014), la part de l'utilisation de l'impression 3D dans la fabrication industrielle en 2025 serait quantifiée comme assez faible (inférieure à 5 %), si celle-ci ne s'oriente que sur des productions de faibles volumes, et des produits à haute valeur ajoutée.

Les auteurs estiment que les retombées positives de la soutenabilité seraient plus importantes si la technologie était applicable sur des volumes plus importants, et ce dans les marchés de production de masse, tels que les produits de grande consommation et l'industrie automobile.

5.1.3 Changement des systèmes de valeur

En supprimant une série de verrous (cf. la section 3.3.2.a) caractéristiques de l'industrie manufacturière traditionnelle (Bouffaron, 2014), l'impression 3D permet de développer de nouveaux systèmes de valeur.

La possibilité de créer des objets fonctionnels et de réparer des objets ou des composants dont la production a été abandonnée ou retardée, mais aussi d'ajouter ou de développer de nouvelles fonctions à un produit, autorise le grand public et les entreprises à développer de nouveaux modes de consommation.

Le développement de cette nouvelle génération de *Do It Yourself* (DIY) laisse place à l'hyperoptimisation et à la personnalisation de masse (cf. la section 4.5). Ce nouveau paradigme permet de favoriser une consommation et une utilisation écoresponsable.

5.2 FabLab et collaboration

Les Fablabs sont des laboratoires de fabrication collectifs et ouverts au public. Ils s'inscrivent dans les modèles émergents dits de collectif et de pair à pair. Le partage de connaissances et des idées entre pairs est au centre des préoccupations. Les Fablabs mettent à disposition plusieurs types d'outils et d'appareils pour la réalisation de projets, le prototypage et la conception d'objets. Pour utiliser la dénomination « Fablab », l'espace en question doit respecter la charte mise en place par le *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) en termes d'action collective et de collaboration. La finalité du Fablab étant collective, elle est alors déterminée par sa communauté qui partage des projets et des valeurs communes. De plus, les Fablabs sont eux-mêmes regroupés en réseaux, échangeant compétences et connaissances à travers le monde. Surtout, l'utilisation de matériel et d'équipements, et notamment les imprimantes 3D, est une condition essentielle à l'esprit et au fonctionnement de ces lieux. C'est d'ailleurs souvent l'un des aspects les plus visibles.

Le Fablab est ainsi considéré comme un *Makerspace*, c'est-à-dire un lieu physique où les individus se rassemblent pour partager leurs connaissances, leur savoir-faire, leur travail, leurs contacts et fabriquer des projets.

C'est au sein de cette communauté que la fabrication additive s'établit et développe de nouveaux modes de collaborations physiques et numériques (cf. la section 5.3). D'après l'étude de Duprat (2016), les principales incitations de l'organisation collective sont la liberté d'action et une volonté de rendre meilleure la société. En s'inscrivant dans un mode de fonctionnement alternatif qui remet en question les valeurs de la logique monétaire et hiérarchique, la communauté développe une plus grande liberté d'action dans les pratiques de l'organisation, afin de rendre la société moins dépendante à certaines formes de consommation matérielles. La fabrication additive permet à ces communautés de développer de nouvelles chaînes de valeur (cf. la section 5.1.2) : réparer des objets, développer des maquettes ou encore produire des prototypes en collaboration avec la communauté et les experts du Fablab.

Garnier (2016) questionne quant à elle les dynamiques organisationnelles et sociales au sein de ces Fablab en France, qu'elle qualifie de « mondes sociaux » ou encore de « tiers-lieu physico virtuels ». L'auteure présente ainsi deux dynamiques en partie contradictoires, mais regroupées dans le même lieu : la première est associative, basée sur des valeurs du mouvement des *makers*, la deuxième est consommatrice, et est associée à des valeurs néolibérales.

Ces deux dynamiques s'interpellent toutes deux auprès des différents usagers de la communauté des Fablabs. Garnier les regroupe en trois catégories : 1) les membres actifs, qui travaillent pour le Fablab en tant que tuteurs - ils sont considérés comme utilisateurs experts de par leurs connaissances des processus d'impression 3D entre autres; 2) les membres-usagers, qui s'appuient sur l'expertise des membres actifs afin de développer leurs propres projets en collaboration avec les autres utilisateurs du Fablab, et qui contribuent à l'expansion de la communauté et au partage des informations ; 3) Les membres-clients, assez isolés du reste de la communauté, qui fréquentent le Fablab pour concevoir leurs projets sans collaboration avec le reste des utilisateurs. Se pose dans ce dernier cas la question de la collaboration et de la propriété intellectuelle au sein des Fablab (cf. section 4.8).

Ainsi, les dynamiques de collaborations au sein des Fablab et *Makerspace* sont aussi multiples que la diversité de ses acteurs, mais l'hybridation de ces divers modes permet le développement de savoirs et de pratiques nouvelles.

5.3 Transformations sociales liées à l'*open source*

Aussi, l'impression 3D s'inscrit au cœur d'un mouvement d'intégration de l'utilisateur au sein des processus de conception et de production. Cela s'opère autant par les approches de co-création que via l'utilisation des plateformes de collaboration en ligne ainsi que par la restructuration des chaînes d'approvisionnement, soit vers des processus numériques plus localisés. Ce sont ici des aspects importants de la troisième révolution industrielle (Gebler & al, 2014).

La co-création avec les consommateurs constitue un aspect critique de l'innovation « par » les usagers. En fournissant des outils (relativement) faciles à utiliser, de même que des moyens de production efficaces, les

récents progrès technologiques ont permis de développer les habiletés nécessaires à la création de bien en transformant le consommateur en consomm-acteur (Rayna & al, 2015).

Le type de co-crédation numérique le plus commun est le *crowdsourcing* – souvent traduit par production participative. Elle implique le savoir et le savoir-faire d'un grand nombre de personnes - *crowd* - pour réaliser certaines tâches traditionnellement effectuées par une entreprise. Elle peut s'inscrire dans un mouvement d'externalisation des connaissances et des coûts liés, résultant en une appropriation/création, ou encore dans un mouvement de partages des connaissances et de création en commun.

Les pratiques de l'*open source* offrent un vaste espace d'échange et de collaboration, tout comme les Fablab. Même s'il semble évident que l'*open source* et la fabrication additive puissent représenter une véritable innovation sociale, il est important de mettre en garde sur les éventuelles dérives de protection de données et des savoirs associés à la société occidentale capitaliste. Il s'agit toutefois d'une position assumée, puisqu'elle est souvent liée à un rejet des formes classiques de propriété intellectuelle, mettant l'emphasis sur le collectif et la volonté de développer une société des communs.

Au-delà des questions de propriété intellectuelle associées à l'*open source*, le libre échange ouvre la porte à des pratiques qui peuvent être jugées à risque pour la société. Par exemple, en matière de contrefaçon à l'égard d'objets remettant en cause la sécurité des utilisateurs, comme la diffusion et la possibilité d'imprimer des clés universelles pour les modèles de serrures et de cadenas standards ; ou encore qui soulèvent des enjeux éthiques comme la diffusion de modèles d'armes à feu en *open source* (voir la figure 23) avec tous les enjeux que cela soulève ; ou encore, pour donner un dernier exemple, la reproduction de composants chimiques de certaines drogues qui seraient éventuellement reproductibles grâce à la bioimpression.



Figure 23 : Liberator : Pistolet imprimé en 3D utilisant des balles réelles

5.4 Impression 3D : Une nouvelle approche de la santé

Au-delà des transformations techniques (cf. la section 2.1) et économiques (cf. la section 4.6), l'application de la fabrication additive dans le domaine de la santé est à l'origine de nombreux changements et ouvre à la fois des pistes majeures d'amélioration pour la santé. Mais cela soulève également des enjeux éthiques importants.

Les premières implications de la fabrication additive dans le domaine de la santé ont été la réalisation de prothèses (dentaires, reins fonctionnels, membres imprimés en 3D). En permettant de produire des prothèses plus rapidement que les processus traditionnels, de façon personnalisée et optimisée grâce aux logiciels de CFAO et aux outils de numérisation 3D, la fabrication additive engendre des changements significatifs dans les secteurs de la santé.

Il est ainsi permis à la communauté de chercheurs, de praticiens de la santé et de *makers* de contribuer à l'avancée de la recherche et de générer des innovations médicales, via les nombreuses plateformes de collaboration (et notamment la plateforme e-NABLE, qui propose de développer des prothèses de main à très bas coût).



Figure 24 : Prothèse de main imprimée en 3D (©Pixabay,2016)

Ces transformations visent également à rendre plus accessibles les processus traditionnels d'accès aux soins de santé pour les pays isolés ou sous-développés.

En matière de bioimpression, les normes et réglementations, de même que l'état des technologies, ne permettent pas de considérer l'impression 3D comme un processus établi ou homologué, pour les implants et les greffes organiques par exemple. Les recherches progressent néanmoins rapidement, et il est très probable que dans un avenir proche, il soit possible de régénérer des organes ou de traiter les grands brûlés.

À partir du moment où la bioimpression devient possible, cela rend possible l'« augmentation » de l'humain, c'est-à-dire la modification du

corps à des fins intentionnelles et non thérapeutiques. Conjuguée avec d'autres technologies, cela s'inscrit dans la perspective d'une vision transhumaniste, dont les fins sont – a minima – sujettes à discussion, tant les enjeux sont importants.

Du point de vue éducatif (cf. la section 5.5), l'idée d'imprimer des répliques de « parties humaines » permet de mettre à la disposition des étudiants des outils d'apprentissage étant très proches de la réalité. Cette technique peut aussi être utilisée par les praticiens à titre d'entraînement avant de procéder à une opération risquée par exemple.

Enfin, il est important de soulever un certain nombre de lacunes dans le domaine de la recherche sur la fabrication additive en termes de dangers pour la santé des utilisateurs (cf. la section 2.6). Trop peu documentée et renseignée par les industriels, l'étude de ses effets aura des répercussions importantes. Conséquemment celle-ci nécessite plus de recherches, de divulgations et de diffusion d'informations.

5.5 Processus d'impression 3D et pédagogie

L'impression 3D et les processus qui s'y rattachent permettent au secteur éducatif de développer de nouvelles formes de pédagogie. C'est ainsi que de nombreuses pratiques de l'impression dans des contextes scolaires ou professionnels, permettent de dégager des enseignements visant un renouvellement des pratiques d'apprentissage.

Les applications de l'impression 3D dans le monde de l'enseignement sont multiples, notamment : 1) physiques, via l'utilisation d'objets fabriqués en 3D comme outils servant à favoriser l'apprentissage des étudiants, par exemple ceux présentant des troubles de la vision (Merbouh, 2016). Que ce soit en archéologie avec la reconstitution d'ossements et pièces numérisées, en mathématiques via l'impression de fonction en 3D, ou encore en chimie avec notamment l'impression de molécules complexes; les applications sont multiples et permettent aux enseignants de mettre des formes sur des concepts, et des notions parfois difficiles à assimiler autrement.

Les applications de l'impression 3D dans le monde de l'enseignement sont aussi 2) numériques, via l'utilisation de plateformes collaboratives. Puisque les pratiques professionnelles et organisationnelles autour de l'impression 3D sont très souvent des pratiques favorisant l'apprentissage collaboratif, de nombreux enseignants ont recours à ce type de collaboration avec les étudiants dans l'élaboration du savoir. Ce qui suppose entre autres choses, de repenser les pratiques pédagogiques, pour des formes moins hiérarchiques entre l'enseignant et les étudiants ; de repenser les pratiques d'évaluations pour des évaluations plus collectives, etc.

D'après Doré (2004) une activité socioconstructiviste se doit de stimuler l'interaction avec les pairs étudiants et avec le milieu dans lequel évolue l'étudiant, composé d'enseignants, techniciens ou encore bibliothécaires. L'auteur donne ainsi l'exemple de l'ingénieur qui sera amené à collaborer avec des « équipes géographiquement distribuées où le partage d'information se fera électroniquement plutôt que sur papier ». Les compétences à acquérir ne sont alors plus uniquement les savoirs des

disciplines, mais également le savoir-faire relié à la « collaboration numérique » avec des personnes proches autant que distantes, connues ou non. Ce mode d'apprentissage par la collaboration oblige l'étudiant à développer de nouvelles aptitudes de communication, de recherche et d'appropriation de l'information. Plusieurs formes d'innovations pédagogiques cherchent à explorer ces nouvelles approches, comme celles de Blum (2014) qui visait à travailler collectivement sur la construction d'un wiki relié à l'impression 3D, en interrogeant notamment la place de l'enseignant dans les processus de motivation des étudiants, la participation de ces derniers dans un travail collectif et virtuel.

Un autre volet de l'apprentissage et de l'impression 3D est celui de la formation. Dans un monde où l'impression 3D bouleverse les processus de production traditionnelle, la question de la formation des techniciens et concepteurs est une des composantes principales de l'adoption des processus de fabrication additive. Ainsi, à long terme, c'est moins les techniques d'impression 3D qui sont nécessaires, que l'intégration de nouvelles pratiques personnelles et professionnelles, lesquelles sont à acquérir et à développer dans l'univers professionnel.

Résumé

- D'un point de vue environnemental, l'impression 3D a un impact sur le cycle de vie des matériaux et des produits (utilisation des matières premières nécessaires sans surplus, diminution du poids, transport plus local en cas de reterritorialisation, épuration des matériaux, impact sur le cycle de vie), mais les études ne sont par contre pas unanimes quant aux avantages environnementaux.
- Les FabLabs traduisent une dynamique collaborative basée sur une culture d'entraide des acteurs. On note une nouvelle économie des modèles numériques reposant sur une logique proche de celle de l'open source (par exemple, partage des fichiers numériques dans des bibliothèques en ligne). Ces espaces permettent la co-conception et l'apprentissage —des technologies et des processus de conception.
- L'évolution rapide de l'impression 3D pose des questions quant à son enseignement et aux nouvelles possibilités offertes (emplois, débouchés, marchés, modèles d'affaires). Notamment, elle suppose, plus que d'apprendre sur les compétences techniques liées à l'impression 3D, mais d'apprendre les pratiques et usages collaboratifs qui permettent sa diffusion au sein d'organisations.
- Des questions demeurent en matière de santé (inhalation de produits toxiques, matériaux plastiques, expositions prolongées, etc.) et en matière éthique (fabrication d'armes à feu à domicile, clés de bagage universelles).

Abstract

- In an environmental perspective, 3D printing has an impact on the lifecycle of products and materials (minimal raw material use, reduce weight, local transportation in reterritorialization cases, material cleansing, lifecycle impact). However, studies are not unanimous on its environmental benefits.
- The Fab Labs reflect a collaborative dynamic between the various players involved based on a culture of mutual aid. A new economy of digital models is being noticed, based on a logic close to open source (i.e. digital files shared on electronic libraries). These spaces enable the co-design and the learning – of technologies and design processes.
- The rapid 3D printing evolution raises questions as to its teaching and the new possibilities it offers (employment, opportunities, markets, business models). Herewith, learning the uses and collaborative practices allowing its diffusion within organizations are as important, if not more than learning 3D printing skills.
- Questions towards health concerns (inhalation of toxic fumes, plastic materials, prolonged exposures, etc.) and ethics (homemade firearms, general baggage keys) are still standing.

Conclusion

Conclusion

À travers ce rapport, nous avons tenté de dresser un tableau transdisciplinaire de l'impression 3D, à la fois en prenant en considération ses spécificités techniques propres, sans lesquelles l'analyse serait creuse, enraciné dans des pratiques isolées, dans des organisations, des économies, et des sociétés. Il nous semble qu'au-delà de chacune de ces sections, la force est dans le lien entre ces points de vue disciplinaires, trop souvent opposés, et que nous avons cherché à faire converger sur la question de l'impression 3D.

À la conclusion de ce document, il nous semble que l'impression 3D porte en elle, associée à son système technique numérique, les racines d'une transformation importante aux niveaux organisationnel, économique et sociétal, mais que les conditions ne sont pas encore réunies pour libérer ce potentiel. Et par conditions, nous n'entendons pas uniquement les conditions techniques, mais également et surtout les conditions institutionnelles, humaines, sociales. Ainsi, nous souhaiterions conclure ce rapport sur quelques recommandations nous semblant importantes pour favoriser un impact positif à l'impression 3D au Canada.

1. La formation à l'impression 3D et aux conditions la favorisant est essentielle. Par conditions la favorisant, nous entendons l'apprentissage et la reconnaissance des compétences humaines, sociales et organisationnelles nécessaires et rendues possibles par cette dernière, notamment (mais pas uniquement) l'autonomie en milieu professionnel, une culture d'échange et de partage professionnel, la sensibilisation aux principes de l'innovation ouverte et de l'*open source*. Il est essentiel de comprendre les nouvelles dynamiques sociales, organisationnelles et économiques touchant à l'impression 3D et la chaîne numérique, car elles sont à la base de l'économie du XXI^e siècle, reposant sur les savoirs. Il nous semble essentiel d'investir dans ces formations et dans une meilleure compréhension de ces dynamiques.

2. L'innovation sociale et technologique (du type Fablabs et Makers) joue un rôle clé. À la fois dans l'imaginaire, mais également dans des pratiques d'entraide et d'échange numériques invisibles. Ici, les impacts sont significatifs et importants. On peut y voir émerger des modèles d'éducation citoyenne touchants tant des individus (de tout âge), mais également des professionnels.

3. Favoriser le maillage économique des entreprises pour la création d'un écosystème dense de l'impression 3D s'avère essentiel dans le but de permettre le renouvellement du tissu industriel canadien. Il semble important d'inventorier et de développer un ensemble d'écosystèmes multidisciplinaires, réunissant des acteurs privés, des chercheurs et des représentants du gouvernement autour des enjeux sociaux, organisationnels et économiques liés à l'impression 3D.

4. Assurer le suivi et l'accompagnement des entreprises – notamment les PME – pour les supporter dans la transition vers l'impression 3D et la chaîne numérique. Une politique fiscale favorisant l'investissement privé dans les infrastructures numériques de demain pourrait également être envisagée.

5. Concevoir un outil d'évaluation du degré de conscientisation des connaissances pour les organisations. Ces dernières ont besoin d'information sur les impacts potentiels de ces nouvelles technologies, tant au niveau de potentiels de la technologie comme telle, mais surtout sur les impacts de ces technologies sur les dimensions organisationnelles, économiques et sociales. À cet effet, il est fortement suggéré de réfléchir au développement d'un outil de diagnostic, lequel permettrait d'explorer et de valider le degré de conscientisation des organisations aux enjeux reliés à l'avènement de ces technologies.

6. Améliorer les connaissances portant sur les avantages et les risques pour la santé, pour l'environnement et sur les enjeux éthiques reliés spécifiquement à l'impression 3D.

Bibliographie & Annexe

Bibliographie

- Ady, J. (2015). A Digitally Disruptive Supply Chain, 26, 6.
- Ashby, M., & Johnson, K. (2014). *Materials and design*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Barlatier, P.-J. (2016). Management de l'innovation et nouvelle ère numérique. *Revue Française de Gestion*, 55–63.
- Barlier, C., & Bernard, A. (2015). *Fabrication additive*. Paris : L'Usine nouvelle. 5. 93-136.
- Bartel, J. (2015). 3D Can Transform Business, Not Just Production, 155, 14.
- Barthes, R. (1985). Sémantique de l'objet. *L'aventure sémiologique*. Paris : Seuil. 251-259.
- Baumers, M., Dickens, P., Tuck, C., & Hague, R. (2016). The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push, 102, 193.
- Berchon, M., & Luyt, B. (2014). *L'impression 3D*. Paris : Eyrolles.
- Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55, 155–162.
- Bernier, S., Luyt, B., & Reinhard, T. (2014). *L'impression 3D pas à pas*. Paris : Marabout.
- Birtchnell, T., & Urry, J. (2013). 3D, SF and the future, 50, 25.
- Blum, G. (2014). *L'émergence des connaissances dans le secteur québécois de l'aéronautique. Une étude de l'innovation conduite par le concept d'avion vert*. UQAM, Montréal, Québec.
- Bogers, M., Hadar, R., & Bilberg, A. (2016). Additive manufacturing for consumer-centric business models: Implications for supply chains in consumer goods manufacturing, 102, 225.
- Bosqué, C. (2015). What are you printing? Ambivalent emancipation by 3D printing, 21, 572.
- Bouffaron, P. (2014). *Impression 3D : Les prémisses d'une nouvelle (r)évolution industrielle ?*.
- Bourell, D. L., Beaman, J. J., Leu, M. C., & Rosen, D. W. (2009). A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead. *Proceedings of RapidTech*, 24–25.
- Brooks, G., Kinsley, K., & Owens, T. (2014). 3D Printing As A Consumer Technology Business Model, 18, 271–n/a.
- Bruijn, E., & Jong, J. (2013). Innovation Lessons From 3-D Printing. *MIT Slogan Management Review*. 54 (2). 43-52.
- Brument, F., & Campagnoli, M. (2016). *Impression 3D - l'usine du futur, 70 créations innovantes*. Malakoff : Dunod
- Buchli, V. (2010). The prototype: presencing the immaterial, 9, 273–286.
<https://doi.org/10.1177/1470357210372718>
- Calderon, A., Griffin, J., & Juan, C. (2014). BeamMaker: an open hardware high-resolution digital fabricator for the masses, 20, 245–255.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1108/RP-J-01-2013-0006>
- Caputo, A., Marzi, G., & Pellegrini, M. M. (2016). The Internet of Things in manufacturing innovation processes, 22, 383–402.
<https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.07.006>.
- Cautela, C., Pisano, P., & Pironti, M. (2014). The emergence of new networked business models from technology innovation: an analysis of 3-D printing design enterprises,

10, 487–501.

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/s11365-014-0301-z>

Chen, Y. P., & Yang, M. D. (2014). Micro-scale manufacture of 3D printing. In H. Liu, S. I. Kuroda, & L. Zheng (Eds.), 670-671 (pp. 936–941).

Chesbrough, H. (2006). Open innovation. *The new imperative for creating and profiting from technology*. Boston : Harvard Business School Press. 183-184

Clément, E. (2016, mai). *Impression 3D: perspectives environnementales selon une approche du cycle de vie*. Communication présentée au congrès RQ3D, Boucherville, Québec.

Cohen, D. L. (2014). Fostering Mainstream Adoption of Industrial 3D Printing: Understanding the Benefits and Promoting Organizational Readiness, 1, 62–69. <https://doi.org/10.1089/3dp.2014.0007>

Connelly, R. (2015). How to leverage additive manufacturing to build better products, 63, 27–28,30.

Conner, B. P., Manogharan, G. P., Martof, A. N., Rodomsky, L. M., Rodomsky, C. M., Jordan, D. C., & Limperos, J. W. (2014). Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. *Additive Manufacturing*, 1–4, 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.005>

Consulat Général de France à San Francisco, Californie

Correa, Z. (2014). 3-d production through the cloud, 62, 23–24.

Da Silva, S., & Blum, G. (2016, mai). *Cartographie préliminaire des acteurs de l'impression 3d au Québec. Quelles sont les implications potentielles en écoconception ?* Communication présentée au 84e congrès de l'ACFAS, Montréal, Québec

Davies, R. (2012). It's time to educate your clients to the reality of 3D printing, 24.

de Jong, J. P., & de Bruijn, E. (2013). Innovation lessons from 3-D printing. *MIT Sloan Management Review*, 54, 43.

Depoorter, B. (2014). Intellectual Property Infringements & 3D Printing: Decentralized Piracy, 65, 1483–1503.

Despeisse, M., & Ford, S. (2015). The Role of Additive Manufacturing in Improving Resource Efficiency and Sustainability. In S. Umeda, M. Nakano, H. Mizuyama, H. Hibino, D. Kiritsis, & G. VonCieminski (Eds.), 460 (pp. 129–136).

Diegel, O., Singamneni, S., Reay, S., & Withell, A. (2010). Tools for sustainable product design: additive manufacturing. *Journal of Sustainable Development*, 3, 68.

Dimitrov, D., Schreve, K., Taylor, A., & Vincent, B. (2007). Rapid prototyping driven design and realisation of large components, 13, 85–91. <https://doi.org/10.1108/13552540710736768>

Doré, S., & al. (2004). Coproduction et partage de documentation francophone de qualité sur le prototypage rapide : une activité d'inspiration socioconstructiviste soutenue par les TIC. *International Journal of Technologies in Higher Education*. 1 (2).

Dougherty, D. (2013). The maker mindset. *Design, Make, Play: Growing the next Generation of STEM Innovators*, 7–11.

Duprat, L. (2016, mai). *L'impact des technologies émergentes sur les modes d'organisation. Étude de cas d'un fabLab marseillais*. Communication présentée au 84e congrès de l'ACFAS, Montréal, Québec

Ebrahim, T. Y. (2016). 3D Printing: Digital Infringement & Digital Regulation, 14, 37–74.

- Eisenberg, M. (2013). 3D printing for children: What to build next? *International Journal of Child-Computer Interaction*, 1(1), 7–13.
<https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2012.08.004>
- Eyers, D. R., & Potter, A. T. (2015). E-commerce channels for additive manufacturing: an exploratory study, 26, 390.
- Facer, K. (2011). *Learning futures: Education, technology and social change*. Taylor & Francis.
- Flynn, M. K. (2013). Private Equity Perspective, 48, 11.
- Ford, S., & Minshall, T. (2015). Defining the Research Agenda for 3D Printing-Enabled Re-distributed Manufacturing. In S. Umeda, M. Nakano, H. Mizuyama, H. Hibino, D. Kiritsis, & G. VonCieminski (Eds.), 460 (pp. 156–164).
- Friedenberg, M. (2014). Thinking in 3-D, 27.
- FSF. (2004). Qu'est-ce qu'un «Logiciel Libre»? - Projet GNU - Free Software Foundation/Fondation pour le Logiciel Libre (FSF/FLL). Repéré à:
<http://www.gnu.org/philosophy/free-sw.fr.html>
- Gao, W., & al. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*. 69. 65-89
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., ... Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65–89.
<https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
- Garnier, C. (2016, mai). *Les « mondes sociaux » d'un tiers-lieu : étude de cas d'Artilect FabLab à Toulouse*. Communication présentée au 84e congrès de l'ACFAS, Montréal, Québec
- Gatto, A., Bassoli, E., Denti, L., Iuliano, L., & Minetola, P. (2015). Multi-disciplinary approach in engineering education: learning with additive manufacturing and reverse engineering, 21, 598–603.
<https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>.
- Gebler, M., Uiterkamp, A. J. S., & Visser, C. (2014). A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy*. 74. 158-167.
- Gierdowski, D., & Reis, D. (2015). The MobileMaker: an experiment with a Mobile Makerspace by Dana Gierdowski and Dan Reis, 33, 480–496.
- Harrop, J. (2017). 3D Printing Materials 2017-2027: Status, Opportunities, Market Forecasts. Retrieved from
<http://www.idtechex.com/research/reports/3d-printing-materials-2017-2027-status-opportunities-market-forecasts-000516.asp>
- Hoover, S., & Lee, L. (2015). Democratization and Disintermediation: Disruptive Technologies and the Future of Making Things. *Research-Technology Management*, 58, 31–36.
- Hu, C. G., & Yin, G. F. (2014). 3D Printing, a New Digital Manufacturing Mode. In J. Cha, S. Y. Chou, J. Stjepandic, R. Curran, & W. Xu (Eds.), 1 (pp. 333–342).
- ISDE. (2016). *Rapport sommaire de la conférence et des ateliers d'Innovation, Sciences et Développement économique Canada sur l'impression 3D et la fabrication additive*
- Jia, F., Wang, X., Mustafee, N., & Hao, L. (2016). Investigating the feasibility of supply chain-centric business models in 3D chocolate printing: A simulation study, 102, 202.
- Jinks, D. (2013). 3D printing: opening new dimensions, 15, 41.
- Kaczmariski, M. (2014). Sectors: Technology - A new dimension.

- Kaivo-Oja, J., Ahlqvist, T., Kuusi, O., Linturi, R., & Roth, S. (2014). Future Industrial Platforms and Radical Technology Foresight: The Case of 3-D Printing in Finland. *Available at SSRN 2520816*.
- Kanto, L., Alahuhta, P., Kukko, K., Pihlajamaa, J., Partanen, J., Vartiainen, M., & Berg, P. (2014). How Do Customer and User Understanding, the Use of Prototypes and Distributed Collaboration Support Rapid Innovation Activities? In D. F. Kocaoglu, T. R. Anderson, T. U. Daim, D. C. Kozanoglu, K. Niwa, & G. Perman (Eds.) (pp. 784–795).
- Katz, R. S. (2015). Modern Infringements: The Unsavory Side of 3D Printing and Digital Replicas, 26, 9.
- Kaur, S. (2012). How is “Internet of the 3D printed products” going to affect our lives, 29, 360–364. <https://doi.org/10.4103/0256-4602.103164>
- Khajavi, S. H., Partanen, J., & Holmström, J. (2014). Additive manufacturing in the spare parts supply chain, 65, 50.
- Khajavi, S. H., Partanen, J., Holmström, J., & Tuomi, J. (2015). Risk reduction in new product launch: A hybrid approach combining direct digital and tool-based manufacturing, 74, 29.
- Khan, O. F., & Mohr, S. (2016). 3D printing and its disruptive impacts on supply chains of the future, 18, 24.
- Kietzmann, J., Pitt, L., & Berthon, P. (2015). Disruptions, decisions, and destinations: Enter the age of 3-D printing and additive manufacturing, 58, 209–215. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2014.11.005>
- Kieviet, A., & Alexander, S. M. (2015). Is Your Supply Chain Ready for Additive Manufacturing?, 19, 34–39.
- Kostakis, V., Niaros, V., Dafermos, G., & Bauwens, M. (2015). Design global, manufacture local: Exploring the contours of an emerging productive model, 73, 126–135. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2015.09.001>
- Kurfess, T., & Cass, W. J. (2014). Rethinking Additive Manufacturing and Intellectual Property Protection, 57, 35–42.
- Larandeau, D. (2016, mai). *La captation de la géométrie, première étape de l'impression 3D : historique et perspectives d'avenir*. Communication présentée au 84e congrès de l'ACFAS, Montréal, Québec
- Lefèvre, G. (2016). Normalisation. Définition, acteurs, objectifs et intérêts. *A3DM-Magazine*. 2. 38-41
- Leroi-Gourhan, A. (1964). *Le Geste et la Parole, tome 1 : Technique et Langage*. Albin Michel.
- Leydesdorff, L., & Etzkowitz, H. (1998). The Triple Helix as a Model for Innovation Studies. *Science & Public Policy*. 25 (3). 195-203
- Linden, A., & J. Fenn. (2003). Understanding Gartner's Hype Cycles. Gartner Strategic Analysis Report No.R-1971. May 30. Stamford, CT: Gartner Inc.
- Lipson, H., & Kurman, M. (2013). *Fabricated: The new world of 3D printing*. John Wiley & Sons.
- Magistrelli, G. (2016). Fabrication additive. Réglementation des dispositifs médicaux. *A3DM-Magazine*. 4. 28-33
- Mahmoud-Jouini, S.B. (2016). Le numérique au service des entités dédiées à l'innovation de rupture. *Revue française de gestion*. 254. 65-87.
- Merbouh, N. (2016, mai). *Développement de l'impression tridimensionnelle (3D) comme aide aux étudiants non voyant en Colombie Britannique*. Communication

présentée au 84e congrès de l'ACFAS,
Montréal, Québec

Minetola, P., Iuliano, L., Bassoli, E., & Gatto, A. (2015). Impact of additive manufacturing on engineering education - evidence from Italy, *21*, 535–555.

Minnick, F. (2015). Endless Possibilities, *97*, 48.

Mohajeri, B., Nyberg, T., Karjaainen, J., Tukiainen, T., Shang, X. Q., Nelson, M., ... Ieee. (2014). The Impact of Social Manufacturing on the Value Chain Model in the Apparel Industry, 378–381.

Mohr, S., & Khan, O. (2015). 3D Printing and Its Disruptive Impacts on Supply Chains of the Future, *5*, 20–25.

Muscard, B., & Seliger, G. (2015). Realization of a learning environment to promote sustainable value creation in areas with insufficient infrastructure. In D. Kreimeier (Ed.), 32 (pp. 70–75).

Noennig, J. R., & Wiesenhuber, S. (2015). Fablabs in Research - Experimental Spaces for Open Science and Technology, 2340–2348.

Nonaka, I., & Takeuchi, H. (1997). *La connaissance créatrice, la dynamique de l'entreprise apprenante*. De Boeck Université

Norman, D. A., & Verganti, R. (2014). Incremental and radical innovation: Design research versus technology and meaning change. *Design Issues*, *30* (1), 78–96.

Nussbaum, B. (2014). Design Education in the Post-Digital Age By John Maeda, *25*, 11.

Oliveira, S. R. M., & Alves, J. L. (2014). I - The next frontier:: Open innovation and prospecting of knowledge for value co-creation in complex environments based on new business models by 3D modeling and additive manufacturing, *8*, 884–902.

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5897/AJBM2014.7455>

Pearson, M. (2013). Digitizing the value chain, *52*, 22–23.

Petrack, I. J., & Simpson, T. W. (2013). 3D Printing Disrupts Manufacturing, *56*, 12–16.

Piller, F. T., Weller, C., & Kleer, R. (2015). Business Models with Additive Manufacturing-Opportunities and Challenges from the Perspective of Economics and Management. In C. Brecher (Ed.) (pp. 39–48).

Pisano, P., Pironti, M., & Rieple, A. (2015). Identify Innovative Business Models: Can Innovative Business Models Enable Players to React to Ongoing or Unpredictable Trends?, *5*, 181–199.
<https://doi.org/10.1515/erj-2014-0032>

Potstada, M., & Zybur, J. (2014). The role of context in science fiction prototyping: The digital industrial revolution, *84*, 101.

Raasch, C., Herstatt, C., & Balka, K. (2009). On the open design of tangible goods. *R&D Management*, *39*, 382–393.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9310.2009.00567.x>

Ratto, M., & Ree, R. (2012). Materializing information: 3D printing and social change. *First Monday*, *17*.

Ray, T. (2015). Rapidly Evolving 3-D Printing Tech Brings New Challenges, *95*, 27.

Raymond, E. S. (1998). La cathédrale et le bazar. Retrieved from <http://www.linux-france.org/article/these/cathedrale-bazar/cathedrale-bazar.html>

Rayna, T., & Striukova, L. (2016). From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation, *102*, 214.

Rayna, T., & al. (2015). Co-creation and user innovation: the role of online 3D printing

platforms, *Journal of Engineering and Technology Management*. 37. 90-102

Rieple, A., & Pisano, P. (2015). Business Models in a New Digital Culture: The Open Long Tail Model, 75–88.

Rieple, A., Pironti, M., & Pisano, P. (2012). Business Network Dynamics and Diffusion of Innovation*, 13–25.

Rosenberg, J., Morand, P., & Turcq, D. (2015). *L'impression 3D: porte d'entrée dans l'industrie du 21ème siècle*. Paris: CCIP.

Sandström, C. G. (2016). The non-disruptive emergence of an ecosystem for 3D Printing - Insights from the hearing aid industry's transition 1989-2008, 102, 160.

Santoso, S. M., & Wicker, S. B. (2016). The future of three-dimensional printing: Intellectual property or intellectual confinement?, 18, 138–155.
<https://doi.org/10.1177/1461444814538647>

Sasson, A., & Johnson, J. C. (2016). *The 3D printing order: variability, supercenters and supply chain reconfigurations* (Vol. 46(1)).

Schroder, M., Falk, B., & Schmitt, R. (2015). Evaluation of Cost Structures of Additive Manufacturing Processes Using a New Business Model. In X. Boucher & D. Brissaud (Eds.), 30 (pp. 311–316).

Seigne, A. (2016, mai). *Fabrication additive métallique : démonstrateur technologique aéronautique*. Communication présentée au 84e congrès de l'ACFAS, Montréal, Québec.

Shou, J., & Yu, R. J. (2014). Business model innovation under the background of 3d printing: supply chain perspective, 62, S115–S116.

Simondon, G. (1969). *Du mode d'existence des objets techniques*. Aubier-Montaigne.

Smith, K. (2015). The Next Industrial Revolution, 16–20.

Star, S. L., & Griesemer, J.R. (1989). "Institutional Ecology, 'Translations', and Boundary Objects: Amateurs and Professionals in Berkeley's Museum of Vertebrate Zoology, 1907-1939. *Social Studies of Science*. 19. 387-420.

Stephen, M. (2016). The Multi-Material FUTURE is here, 74, 15.

Tatham, P., Loy, J., & Peretti, U. (2015). Three dimensional printing - a key tool for the humanitarian logistician?, 5, 188–208.

Tattersall, H. (2013). Far out, 83, 60.

Thompson, R. (2012). Design, les procédés de fabrication. Dourdan : Vial.

Valpreda, F. (2015). 3D Printing Awareness the future of making things. In M. V. O. Segovia, P. Urban, & F. H. Imai (Eds.), 9398.

Van der zee et al., (2015). *Open Innovation in Industry, Including 3D Printing*. European Parliament's Committee on Industry, Research and Energy (ITRE), Bruxelles.

Waller, M. A., & Fawcett, S. E. (2014). Click here to print a maker movement supply chain: how invention and entrepreneurship will disrupt supply chain design. *Journal of Business Logistics*, 35, 99–102.
<https://doi.org/10.1111/jbl.12045>

Wang, J., Wang, X., Shou, W., & Xu, B. (2014). Integrating BIM and augmented reality for interactive architectural visualisation, 14, 453.

Webster, S. A. (2014). A Network of Little Silicon Valleys, 152, 10.

West, J., & Kuk, G. (2016). The complementarity of openness: How MakerBot leveraged Thingiverse in 3D printing, 102, 169.

Winner, L. (1980). Do artifacts have politics? *Daedalus*, 121–136.

Wittbrodt, A.G., & al. (2013). Life-Cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-D printers. *Mechatronics*, 23 (6). 713-726

Wittbrodt, B. T., Glover, A. G., Laureto, J., Anzalone, G. C., Oppliger, D., Irwin, J. L., & Pearce, J. M. (2013). Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-D printers. *Mechatronics*, 23(6), 713–726.
<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.06.002>

Wohlers, T., & Caffrey, T. (2013). Additive Manufacturing: Going Mainstream, 150, 67–73.

Wohlers, T., & Gornet, T. (2012). History of additive manufacturing. *Wohler Associates, Inc., Fort Collins, Colorado*.

Wohlers, T., Campbell, I., & Caffrey, T. (2016). *3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry. Annual Worldwide Progress Report*. Wohlers Associates.

Wu, D., Thames, J. L., Rosen, D. W., & Schaefer, D. (2012). Towards a cloud-based design and manufacturing paradigm: looking backward, looking forward (Vol. ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, pp. 315–328). American Society of Mechanical Engineers.

Xin, L. H., Liu, S. M., & Huang, H. W. (2014). Exploration and Application of 3D Printing Technology in Innovative Experimental Training, 424–428.

Yang, X. H., & Zhu, Y. P. (2015). Ergonomics in Product Design. In P. Yarlagadda (Ed.), 27 (pp. 1591–1596).

Zhang, J. H. (2013). 3D Printing Technology-A New Mode of Computer-

aided Style Design in This New Age. In P. Yarlagadda & Y. H. Kim (Eds.), 336-338 (pp. 1383–1386).

Annexe

Stratégies de recherche utilisée pour la revue de littérature

Catalogue Ariane

Sujets : impression tridimensionnelle

26 résultats

Limite : Livres et livres électroniques : 20 résultats (EndNote)

Bases de données et moteurs multidisciplinaires

Academic Search Complete (interrogée le 19 avril 2016)

DE "THREE-dimensional printing"

2528 résultats

Limite : revues académiques (relues par un comité de lecture) : 1520 résultats

Lien permanent vers les résultats de la recherche :

<https://acces.bibl.ulaval.ca/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&bquery=DE+%26quot%3bTHREE-dimensional+printing%26quot%3b&cli0=RV&clv0=Y&lang=fr&type=1&sitelive=e=ehost-live>

Cairn (interrogée le 11 juillet 2016) Articles en français

TI "technologies additives" or "fabrication additive" or "fabrication par couches" or "impression 3D" or "impression tridimensionnelle" or "impression en trois dimensions"

3 résultats (EndNote)

Érudit (interrogée le 14 juillet 2016) Articles en français

Titre, résumé, mots clés : "technologies additives" or "fabrication additive" or "fabrication par couches" or "impression 3D" or "impression tridimensionnelle" or "impression en trois dimensions"

8 Résultats (j'ai ajouté à ce nombre un article sur les FabLabs) >>> 9 résultats (EndNote)

FRANCIS (interrogée le 11 juillet 2016)

SU "3D printing"

4 résultats (EndNote)

Google Scholar (interrogée le 13 juillet 2016) – Français uniquement

"technologies additives" or "fabrication additive" or "fabrication par couches" or "impression 3D" or "impression tridimensionnelle" or "impression en trois dimensions"

6 résultats (EndNote) ; Doublons retirés : 3 résultats

Repère (interrogée le 14 juillet 2016) – Français uniquement

SU "technologies additives" or "fabrication additive" or "fabrication par couches" or "impression 3D" or "impression tridimensionnelle" or "impression en trois dimensions"

Limites : Public cible : professionnels ; Niveau académique :
collégial/universitaire
3 résultats (EndNote) ; doublons retirés : 2 résultats

Web of Science (interrogée le 19 avril 2016)

Topic("3d printing" or "three dimensional printing" or "3 dimensional printing")
2539 résultats
Limite : 2000-2016 : 2502 résultats (EndNote)
Limite : Reviews : 98 résultats (EndNote)

Bases de données en art et design

Art Full Text (interrogée le 13 juillet 2016)

SU "THREE-dimensional printing"
189 résultats
Limite : revues académiques (relues par un comité de lecture) : 36 résultats (EndNote)

Design and Applied Arts Index (interrogée le 13 juillet 2016)

SU"3D printing"
217 résultats
Limite : revues académiques (relues par un comité de lecture) : 21 résultats (EndNote)
Doublons retirés : 19 résultats

Bases de données en économie

EconLit (interrogée le 14 avril 2016)

all("3d printing" or "three dimensional printing" or "3 dimensional printing" or "additive manufacturing" or "additive technologies" or "additive fabrication" or "layered manufacturing")
10 résultats (EndNote)

Base de données en sciences de l'administration

ABI/Inform Complete (interrogée le 19 avril 2016)

SU.EXACT("3-D printers") OR SU.EXACT("Additive manufacturing")
1207 résultats
Limite : SAUF quotidiens, magazines, dépêches d'agence de presse :
852 résultats (EndNote)

Business Source Complete (interrogée le 19 avril 2016)

DE"THREE-dimensional printing"
1811 résultats
Limite : revues académiques (relues par un comité de lecture) : 188 résultats
Doublons retirés : 149 résultats (EndNote)

Bases de données en éducation

ERIC (interrogée le 16 mai 2016)

all("3d printing" or "three dimensional printing" or "3 dimensional printing" or "additive manufacturing" or "additive technologies" or "additive fabrication" or "layered manufacturing")
35 résultats (EndNote)

Education Source (interrogée le 16 mai 2016)

SU("3d printing" or "three dimensional printing" or "3 dimensional printing" or "additive manufacturing" or "additive technologies" or "additive fabrication" or "layered manufacturing")

304 résultats ; doublons retirés : 294 résultats (EndNote)

Bases de données en sciences sociales

Anthropology Plus (interrogée le 13 juillet 2016)

all("3d printing" or "three dimensional printing" or "3 dimensional printing" or "additive manufacturing" or "additive technologies" or "additive fabrication" or "layered manufacturing")

1 résultat (EndNote)

International Bibliography of the Social Sciences - IBSS (interrogée le 16 mai 2016)

all("3d printing" or "three dimensional printing" or "3 dimensional printing" or "additive manufacturing" or "additive technologies" or "additive fabrication" or "layered manufacturing")

11 résultats (EndNote)

PsycNET (interrogée le 13 juillet 2016)

Sans PsycTESTS et PsycCRITIQUES

Abstract("3d printing" or "three dimensional printing" or "3 dimensional printing" or "additive manufacturing" or "additive technologies" or "additive fabrication" or "layered manufacturing")

24 résultats (EndNote) ; doublons retirés : 18 résultats

Psychology and Behavioral Sciences Collection (interrogée le 13 juillet 2016)

SU"THREE-dimensional printing"

47 résultats

Limite : revues académiques (relues par un comité de lecture) : 37 résultats (EndNote)

Doublons retirés : 24 résultats

Sociological Abstracts (interrogée le 11 juillet)

all("3d printing") or all("three dimensional printing") or all("3 dimensional printing") or all("additive manufacturing") or all("additive technologies") or all("additive fabrication") or all("layered manufacturing")

11 résultats ; doublons retirés : 4 résultats (EndNote)

SocINDEX (interrogée le 11 juillet 2016)

SU"THREE-dimensional printing"

5 résultats (1 en chinois) ; doublons retirés : 3 résultats (EndNote)

Social Sciences Full Text (interrogée le 13 juillet 2016)

SU"THREE-dimensional printing"

74 résultats

Limite : revues académiques (relues par un comité de lecture) : 1 résultat (EndNote)

Doublons retirés : 0 résultat

Bases de données en science politique

PAIS International (interrogée le 13 juillet 2016)

all("3d printing" or "three dimensional printing" or "3 dimensional printing" or "additive manufacturing" or "additive technologies" or "additive fabrication" or "layered manufacturing")

9 résultats (EndNote)

Doublons retirés : 7 résultats

Worldwide Political Science Abstracts (interrogée le 13 juillet 2016)

all("3d printing" or "three dimensional printing" or "3 dimensional printing" or "additive manufacturing" or "additive technologies" or "additive fabrication" or "layered manufacturing")

7 résultats

Limite : revues académiques (relues par un comité de lecture) : 2 résultats (EndNote)

Doublons retirés : 1 résultat

Bases de données en communication

Communication & Mass Media Complete (interrogée le 13 juillet 2016)

all("3d printing" or "three dimensional printing" or "3 dimensional printing" or "additive manufacturing" or "additive technologies" or "additive fabrication" or "layered manufacturing")

13 résultats

Limite : revues académiques (relues par un comité de lecture) : 8 résultats (EndNote)

Doublons retirés : 5 résultats

Communication Abstracts (interrogée le 13 juillet 2016)

all("3d printing" or "three dimensional printing" or "3 dimensional printing" or "additive manufacturing" or "additive technologies" or "additive fabrication" or "layered manufacturing")

7 résultats (EndNote)

Doublons retirés : 2 résultats

Bases de données de mémoires et thèses

ProQuest Dissertations & Theses Global (interrogée le 13 juillet 2016)

IF("3d printing")

119 résultats

Limite : thèses en sciences humaines et sociales seulement : 18 résultats (EndNote)

