

Louvain School of Management

Les imprimantes 3D au sein des entreprises

Analyse des risques et opportunités

Auteur : Maureen Willame
Promoteur : Professeur François Fouss
Année académique 2018-2019
Master en Ingénieur de gestion

Résumé

L'impression en trois dimensions, aussi appelée fabrication additive, est une technologie révolutionnaire. Son utilisation dans les entreprises est déjà assurée et ses impacts sont sensiblement identiques quel que soit le secteur. Quant au secteur médical, les retombées de cette technologie sont encore floues. Son utilisation est encore en pleine croissance car le secteur médical nécessite énormément de contrôles et d'autorisations à recevoir auprès des autorités compétentes.

Le but de ce mémoire sera de déterminer les avantages de l'impression tridimensionnelle dans le secteur médical en analysant la littérature et en menant des interviews auprès de professionnels médicaux exerçant en Belgique. Nous pourrons ainsi déterminer à quelle fréquence et pour quelles utilisations est employée la fabrication additive. Toute nouvelle technologie amenant avec elle son lot de points faibles, ceux-ci seront évalués.

Remerciements

Lors de la rédaction de ce mémoire, j'ai pu compter sur le soutien sans faille de nombreuses personnes. C'est pourquoi j'aimerais remercier toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la rédaction de ce dernier. J'aimerais néanmoins en remercier certaines plus particulièrement.

Tout d'abord, j'aimerais remercier mon promoteur, le Professeur François Fouss, pour son aide précieuse, sa disponibilité ainsi que ses conseils constructifs prodigués durant cette dernière année.

Ensuite, je tiens à remercier mes parents qui m'ont permis d'effectuer un échange aux Etats-Unis, à l'UNCG (University of North Carolina at Greensboro). Durant cet échange, j'ai pu consulter des livres, des documents ou des revues qui traitaient de ce sujet.

Ma famille et mes amis ont également été d'un grand soutien durant cette dernière année ainsi que tout au long de mon parcours à la Louvain School of Management. Leur soutien fut indispensable que ce soit lors de la recherche de répondants ou encore lors de la rédaction de ce mémoire.

De plus, je voudrais remercier Monsieur Olivier Stormacq, Madame Cindy Fripiat et Madame Elisa Conte pour leur relecture assidue.

Enfin, je souhaite remercier le Docteur Steven Creve, Monsieur Jacques Godart, le Docteur Juliette Heimann, Monsieur Jose-Antonio Pineiro, le Professeur Raphaël Olszewski, Monsieur Corentin Taminiaux et Mademoiselle Manon Van der Vorst pour le précieux temps qu'ils ont accepté de m'accorder et pour les entretiens très enrichissants que nous avons pu avoir.

Pour finir, je souhaite remercier l'ASBL Wap's Hub située à Tournai qui m'a permis d'assister à la conférence sur l'impression 3D, présentée par Monsieur Laurent Voets. Les informations que j'ai pu en retenir m'ont été très précieuses.

Table des matières

Liste des illustrations et graphiques	8
Abréviations utilisées	9
Introduction	12
Section 1 : Partie théorique	15
1. Revue historique.....	15
1.1. Résumé historique	17
1.2. Utilisation d'une imprimante 3D	18
1.2.1. Imprimante 3D.....	19
1.2.2. Matière première.....	19
1.2.3. Fichier digital.....	20
1.3. Techniques d'impression	23
1.3.1. Photopolymérisation.....	23
1.3.2. Extrusion.....	24
1.3.3. Projection de matière	25
1.3.4. Projection de liant	25
1.3.5. Sheet lamination	25
1.3.6. Fusion sur lit de poudre	26
1.3.7. Direct Energy Deposition	26
1.4. Inventions dérivées	27
1.5. Législation.....	27
2. Définition des concepts	29
2.1. Computer-Aided Design	29
2.2. Extrudeur.....	29
2.3. Filament	29
2.4. Frittage laser.....	29

2.5.	Impression.....	29
2.6.	Impression 3D.....	29
2.7.	Impression par dépôt de matière fondue.....	30
2.8.	Impression par liage de poudre.....	30
2.9.	Internet des objets.....	30
2.10.	Stéréolithographie.....	30
3.	Impacts.....	31
3.1.	Secteur artistique.....	32
3.2.	Secteur commercial.....	33
3.3.	Secteur agroalimentaire.....	34
3.4.	Secteur industriel.....	35
3.5.	Secteur de la construction.....	37
3.6.	Secteur militaire.....	38
3.7.	Secteur aérospatial.....	39
4.	Risques et limites de l'impression tridimensionnelle.....	41
5.	Améliorations futures.....	43
5.1.	Secteur commercial.....	43
5.2.	Secteur agroalimentaire.....	43
5.3.	Secteur industriel.....	43
5.4.	Secteur de la construction.....	44
5.5.	Secteur militaire.....	45
5.6.	Secteur aérospatial.....	45
6.	Impression 3D au sein du secteur médical.....	46
6.1.	Aperçu historique.....	46
6.2.	Impacts.....	48
6.2.1.	Impression d'implants et de prothèses.....	48
6.2.2.	Chirurgie.....	49

6.2.3. Impression d'organes.....	50
6.2.4. Pharmacie	51
6.3. Améliorations futures.....	52
Section 2 : Partie pratique	54
1. Méthodologie	54
2. Présentation des personnes interviewées.....	55
2.1. Docteur Steven Creve	55
2.2. Monsieur Jacques Godart.....	56
2.3. Docteur Juliette Heimann	56
2.4. Monsieur Jose-Antonio Pineiro	56
2.5. Professeur Raphaël Olszewski	57
2.6. Monsieur Corentin Taminiaux.....	57
2.7. Mademoiselle Manon Van der Vorst.....	57
3. Analyse des résultats	58
3.1. La technologie au sein du secteur médical	59
3.2. Avantages de l'impression tridimensionnelle.....	60
3.2.1. Impression d'attelles.....	61
3.2.2. Remplacement de pièces endommagées.....	62
3.2.3. Dentisterie et stomatologie	62
3.2.4. Chirurgie.....	63
3.3. Barrières à l'utilisation de l'impression tridimensionnelle.....	64
3.4. Risques de l'impression tridimensionnelle	65
3.5. Perception quant à l'utilisation de l'impression en trois dimensions	66
3.6. Futur de l'impression tridimensionnelle	67
Section 3 : Pistes et limites.....	69
Conclusion.....	71
Bibliographie.....	74

Annexes.....	Error! Bookmark not defined.
Annexe n°1 : Révolutions industrielles	Error! Bookmark not defined.
Annexe n°2 : Statistiques concernant l'utilisation des différentes techniques d'impression 3D	Error! Bookmark not defined.
Annexe n°3 : Mécanisme des bioimprimantes CIJ et DOD .	Error! Bookmark not defined.
Annexe n°4 : Guide d'entretien	Error! Bookmark not defined.
Annexe n°5 : Retranscription de l'entretien réalisé avec le Docteur Steven Creve en date du 23 mai 2019	Error! Bookmark not defined.
Annexe n°6 : Retranscription de l'entretien réalisé avec Monsieur Jacques Godart en date du 17 mai 2019	Error! Bookmark not defined.
Annexe n°7 : Retranscription de l'entretien réalisé avec le Docteur Juliette Heimann en date du 14 mai 2019	Error! Bookmark not defined.
Annexe n°8 : Retranscription de l'entretien réalisé avec Monsieur Jose-Antonio Pineiro en date du 17 mai 2019.....	Error! Bookmark not defined.
Annexe n°9 : Retranscription de l'entretien réalisé avec le Professeur Raphaël Olszewski en date du 23 mai 2019.....	Error! Bookmark not defined.
Annexe n°10 : Retranscription de l'entretien réalisé avec Monsieur Corentin Taminiaux en date du 22 mai 2019.....	Error! Bookmark not defined.
Annexe n°11 : Retranscription de l'entretien réalisé avec Mademoiselle Manon Van der Vorst en date du 20 mai 2019.....	Error! Bookmark not defined.

Liste des illustrations et graphiques

Illustration n° 1: Résumé historique de l'impression 3D	18
Illustration n° 2: Schéma d'impression.....	19
Illustration n° 3: Résumé historique de l'impression 3D dans le secteur médical	47
Illustration n° 4: Docteur Steven Creve	55
Illustration n° 5: Jacques Godart.....	56
Illustration n° 6: Docteur Juliette Heimann.....	56
Illustration n° 7: Jose-Antonio Pineiro.....	56
Illustration n° 8: Professeur Raphaël Olszewski.....	57
Illustration n° 9: Corentin Taminiaux	57
Illustration n° 10: Manon Van der Vorst.....	57
Illustration n° 11: De l'Industrie 1.0 à l'Industrie 4.0	Error! Bookmark not defined.
Illustration n° 12: Most used 3D printing technologies in 2017 and 2018	Error! Bookmark not defined.
Illustration n° 13: Mécanisme des bioimprimantes CIJ et DOD	Error! Bookmark not defined.

Abréviations utilisées

ABS : Acrylonitrile Butadiène Styène

BJ : Binder Jetting

CAD/CAO : Computer-Aided Design/ Conception Assistée par Ordinateur

CAE/IAO : Computer Aided-Engineering/ Ingénierie Assistée par Ordinateur

CLIP : Continuous Liquid Interface Production

DLP : Digital Light Projection

DOD : Drop on demand

ESA : Agence Spatiale Européenne

FDM : Impression par dépôt de matière fondue

IoT : Internet des objets

IRM : Imagerie par Résonance Magnétique

ISO : Organisation Internationale de Normalisation

IT : Technologies de l'information

ITOP : Integrated Tissue-Organ Printer

KCE : Centre Fédéral d'Expertise des Soins de Santé

MIT : Massachusetts Institute of Technology

MSL: Microstéréolithographie

NASA: National Aeronautics and Space Administration

PC: Polycarbonate

PEI: Polyétherimide

PLA : Acide polylactique

PVA : Alcool polyvinylique

SDL : Laminage par dépôt sélectif

SLA : Stéréolithographie

SLS : Frittage sélectif par laser

2D : Deux dimensions

3D : Trois dimensions

Introduction

L'impression en trois dimensions est une technologie révolutionnaire qui fait parler d'elle depuis bien des années. En effet, le monde médiatique en parle comme la future révolution. Les objectifs que l'impression en trois dimensions devrait atteindre sont très prometteurs et importants. Également appelée fabrication additive étant donné sa nature, cette technologie permettrait de réduire la quantité de déchets et de faciliter la vie de nombreuses personnes.

L'impression en trois dimensions destinée à un usage personnel ne semble pas amener beaucoup d'avantages si ce n'est la possibilité d'imprimer divers objets à son domicile. Cela donnerait libre cours à l'imagination : imprimer la nouvelle paire de chaussures tant désirée sans même sortir de chez soi ou encore imprimer rapidement un petit repas sain. Les avantages que représente une imprimante 3D pour chaque individu sont relativement connus mais qu'en est-il des entreprises ?

Les avantages pour ces dernières sont nettement moins connus d'autant plus qu'ils varient en fonction du secteur concerné. Dès lors, il est intéressant de creuser plus loin et de se demander ce que pourrait amener une imprimante 3D au sein d'une entreprise. Afin de mener à bien cette recherche, un focus sur le secteur médical sera opéré après un passage en revue des avantages dans différents secteurs. « **Quels sont les risques et opportunités que représente l'impression 3D pour le secteur médical ?** » est donc la question de recherche à laquelle nous tenterons de répondre tout au long de ce travail.

Tout d'abord, la première partie, à savoir la partie théorique, se base sur des recherches afin de répondre à cette question. Le but de cette partie sera d'apporter la vue la plus générale possible quant à la fabrication additive en la définissant, en la retraçant dans le temps et en expliquant les différents éléments requis à son bon fonctionnement. L'impression en trois dimensions peut avoir recours à différentes techniques ainsi que différents matériaux. C'est dans cette optique qu'une courte étude de ceux-ci sera menée. La question du droit d'auteur étant ici de mise, nous tenterons ensuite de voir quelles normes apportent une protection pour les personnes qui utilisent des designs trouvés sur internet et pour celles qui les créent.

Ensuite, toujours dans cette première partie, nous allons nous intéresser aux impacts de la fabrication additive dans différents secteurs. Les secteurs étudiés couvrent, entre autres, le secteur médical, industriel ou encore militaire et aérospatial. Une dernière étude sera menée

quant aux futures améliorations ou projets en cours de développement concernant les différents secteurs.

Enfin, la deuxième partie, à savoir la partie pratique, sera basée sur des interviews menées auprès de personnes impliquées dans le secteur médical. Les profils varient entre directeur informatique, kinésithérapeute, chirurgien, prothésiste dentaire ou encore médecin généraliste. Certains sont indépendants et d'autres travaillent au sein d'un hôpital. Ces différents profils permettent d'observer les diverses perceptions en fonction du statut des interviewés. L'objectif est de résumer l'opinion des intervenants et étudier leur enclin à utiliser une imprimante 3D.

Pour finir, nous terminerons avec une analyse de pistes et de limites à prendre en compte dans le cadre de ce travail.

Section 1 : Partie théorique

1. Revue historique

L'impression consiste à transformer un fichier digital en une copie tangible. Dans le cas d'impression 2D, le support est généralement une feuille de papier où l'encre n'est déposée qu'une seule fois. Cette impression en deux dimensions se base sur un fichier digital. En effet, un fichier texte (.txt), Microsoft Word (.docx) ou tout autre programme de traitement de texte est nécessaire pour l'impression d'un texte écrit à l'ordinateur (Hood-Daniel & Floyd Kelly, 2011). Dans le cas d'une impression en trois dimensions, la copie tangible prend la forme d'un objet (Kalaskar, 2017). Cette impression, aussi appelée fabrication additive, est réalisée en trois dimensions en superposant des couches de matière jusqu'à l'obtention du design souhaité (Committee on Space-Based Additive Manufacturing & Aeronautics and Space Engineering Board, 2014). La fabrication se faisant par addition de matière, la quantité de déchets est minime. Ce détail permet de différencier la fabrication additive de la fabrication soustractive (McMills, 2018).

Ensuite, l'impression en trois dimensions se base sur une autre invention qui est la 3D. Sans cette invention, l'impression tridimensionnelle serait impossible. La 3D est apparue en 1830 avec la stéréoscopie qui permet pour la première fois d'observer une perception de profondeur à partir d'images. La 3D consiste en un espace sur trois axes orthogonaux à savoir la longueur, la largeur et la hauteur (Voets, 2019).

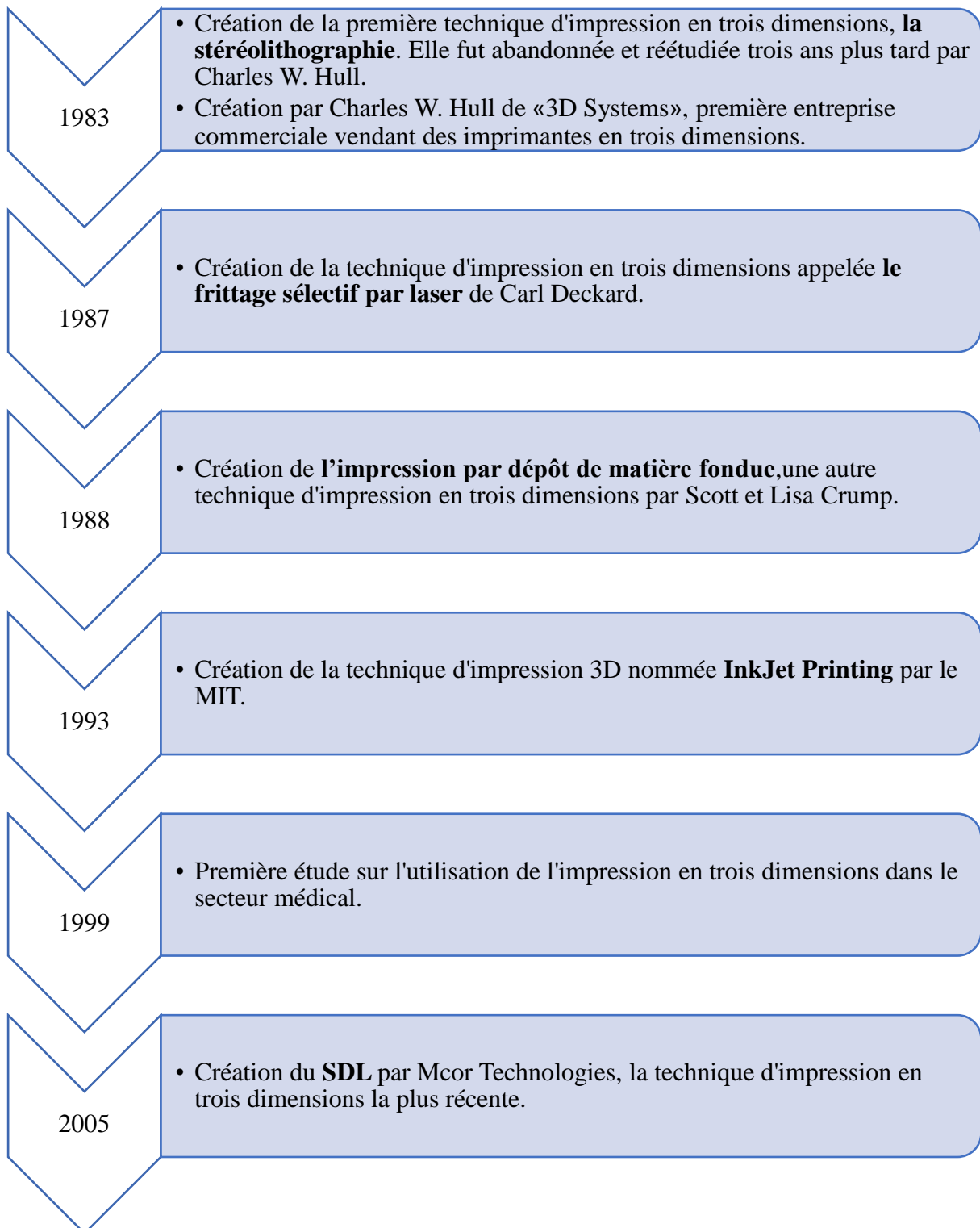
De plus, l'impression tridimensionnelle fait partie de l'industrie 4.0 où se côtoient l'industriel et le numérique (Voets, 2019). L'industrie 4.0, c'est-à-dire la quatrième révolution industrielle, fait suite aux trois premières révolutions industrielles. Ces dernières ont eu un impact considérable par les inventions révolutionnaires qu'elles ont amenées comme les machines à vapeur ou encore les ordinateurs. Comme nous pouvons le voir sur le schéma en annexe¹, une révolution industrielle a lieu lorsque les limites de production sont repoussées par une invention (Maguire, s.d.). L'impression tridimensionnelle fait partie de ces innovations repoussant les limites de production. L'industrie 4.0 essaie de répondre aux besoins des consommateurs grâce à la digitalisation. Nous sommes dans une ère de « *Personnalisation de masse* » où les produits

¹ Voir Annexe n°1

consommés doivent correspondre aux besoins des consommateurs et être disponibles rapidement (Wayenberg, 2018).

Les propriétés d'une imprimante 3D sont multiples. En effet, différentes matières premières ainsi que différents produits finis peuvent prendre forme à l'aide d'une seule et unique machine (Walker, 2013). Les premières techniques d'impression en trois dimensions ont fait leur apparition dans les années 80 (Kalaskar, 2017). Depuis, cette technologie est en plein essor et ne cesse de s'améliorer.

1.1. Résumé historique ²



² Source :

Touré, A. (2017, Mai 22). *L'histoire de l'impression 3D: Les technologies d'impression 3D des années 80 à nos jours*.

Pêcheux, F. (s.d.). *Impression 3D*.

Kalaskar, D. M. (2017). *3D Printing in Medicine*. London: Woodhead Publishing.

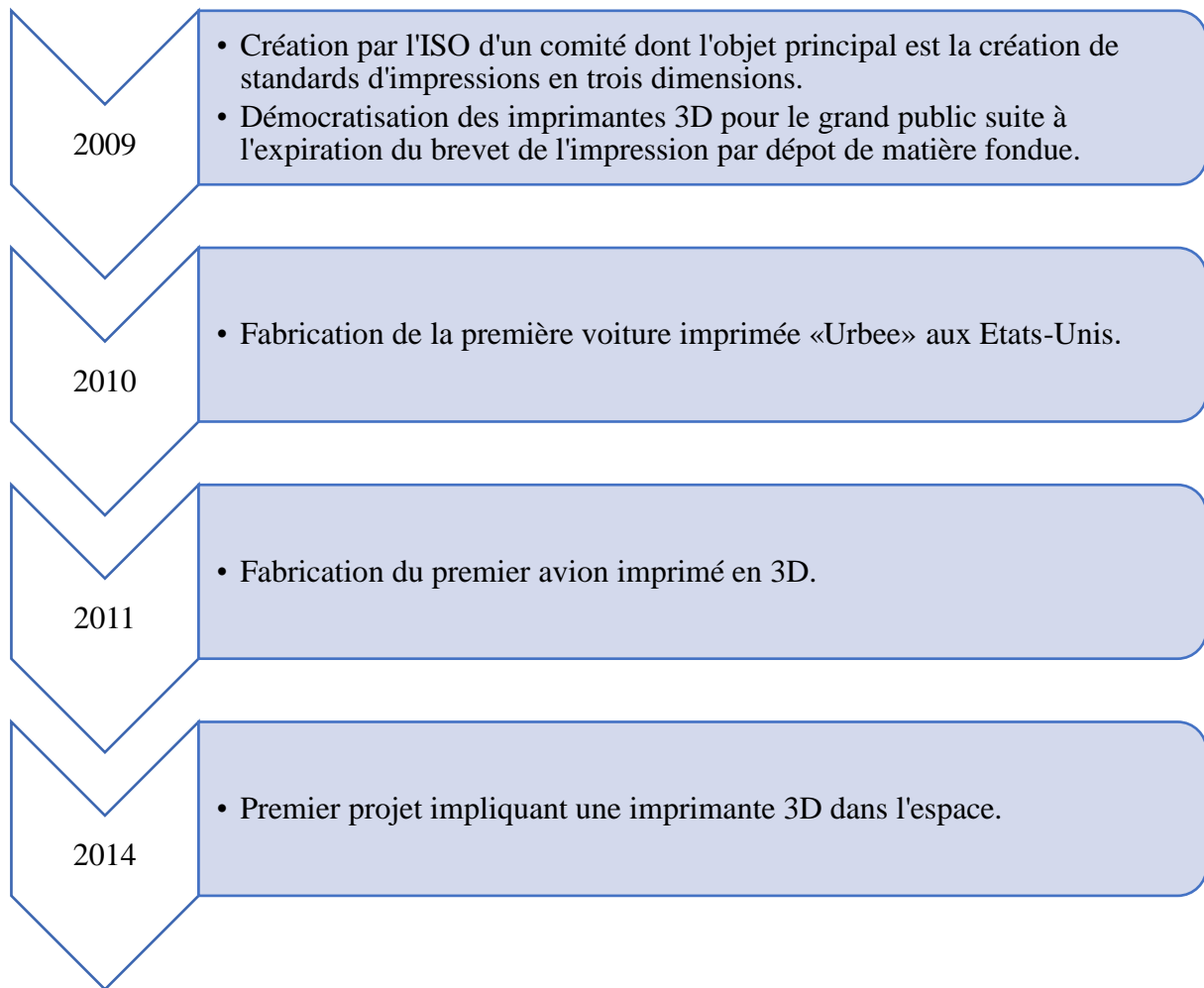


Illustration n° 1: Résumé historique de l'impression 3D

1.2. Utilisation d'une imprimante 3D

L'impression en trois dimensions requiert certains éléments afin d'assurer son bon déroulement. Il faut tout d'abord une imprimante 3D. Il faut également fournir à cette imprimante de la matière première ainsi qu'un fichier digital reprenant la description de l'objet à imprimer. Après vérification de ce fichier par un programme approprié, l'impression peut être effectuée. Ce programme permet d'enlever les superflus et d'apporter les ultimes modifications nécessaires (McMills, 2018).

Lorsque l'objet devant être imprimé possède une taille trop importante, il est possible d'imprimer cet objet en plusieurs objets distincts. Il suffit ensuite de souder ces différentes parties ensemble en utilisant un liant spécifique à la matière choisie. Pour améliorer l'aspect final de l'impression, il est possible de polir, teindre ou peindre l'objet imprimé (McMills, 2018).

1.2.1. Imprimante 3D

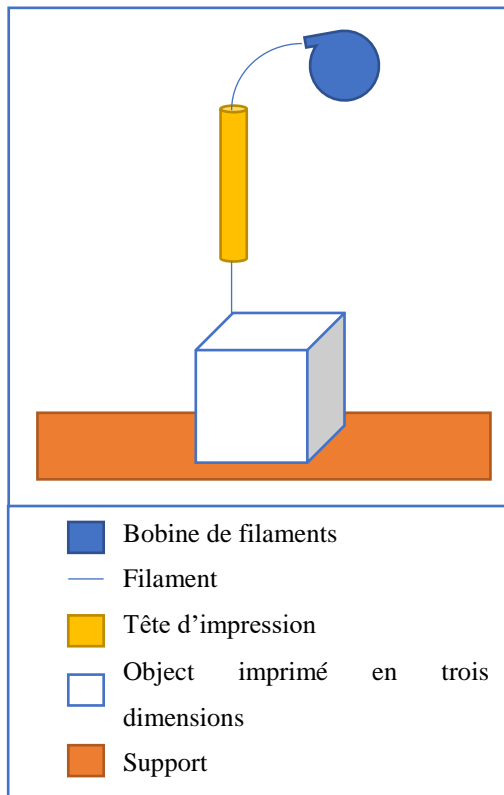


Illustration n° 2: Schéma d'impression

Une imprimante 3D regroupe certaines caractéristiques que l'on retrouve quelle que soit la technique d'impression utilisée. Tout d'abord, une matière première est nécessaire. Dans le cas de l'impression par dépôt de matière fondue, la matière première prend la forme d'un filament pouvant provenir de différentes sources comme de l'amidon de maïs. Ce filament est stocké sous forme de bobine. Ensuite, vient la tête d'impression. Cette dernière va effectuer le processus d'impression. Dans le cas de l'impression par dépôt de matière fondue, le filament passe par la tête d'impression aussi appelée extrudeur. La qualité du produit fini est déterminée par le diamètre de l'extrudeur. Plus celui-ci est fin, plus la finition sera précise. Ce filament est ensuite chauffé et déposé sur un support, qui est nécessaire pour déposer

l'objet imprimé. Celui-ci pourra être fixe ou non et être pourvu d'une source de chaleur (McMills, 2018).

1.2.2. Matière première

Les matériaux utilisés pour imprimer des objets en 3D sont le plastique mais également le caoutchouc (Films Media Group & Österreichischer Rundfunk, 2013). Les métaux, la céramique, le bois, la cire, le béton, le papier, la glace et aussi certains aliments ou de la matière vivante peuvent également servir de matière première (Voets, 2019). Lors de l'impression d'un objet, divers matériaux peuvent y être assimilés (Kalaskar, 2017).

Parmi les matières plastiques utilisables se trouvent les polymères PVA (alcool polyvinylique), ABS (acrylonitrile butadiène styrène) ou encore PLA (acide polylactique). Ces matériaux sont employés en fonction de l'utilisation de l'objet créé (Sculpteo, s.d.).

L'ABS, qui est un plastique opaque, est très résistant à la chaleur et nécessite une haute température lors de son passage à l'état liquide. Le support utilisé doit être chauffant pour éviter

des malformations du produit fini. C'est une matière déconseillée lors de la fabrication de produit en contact avec le feu puisque ce polymère est inflammable (McMills, 2018).

L'ABS doit être utilisé dans une pièce aérée pour éviter la production de fumées pouvant causer certains problèmes de santé, tandis que le PLA est moins toxique et donc ne nécessite pas un aménagement spécifique. La température nécessaire pour faire fondre le filament est moindre que lors de l'utilisation d'ABS, ce qui rend l'ABS plus résistant à la chaleur que le PLA. Ce type de plastique a les avantages d'être transparent et modifiable par ajout de couleurs (McMills, 2018).

Le PVA est flexible et nécessite un support chauffé et une température similaire à celle de l'utilisation d'ABS. Cette matière se dissout dans l'eau. Ce matériel est donc déconseillé en cas de présence d'humidité dans l'air. Cette caractéristique permet néanmoins de créer des pièces concaves ou de retirer les parties sans nécessité lorsque l'impression est finie (McMills, 2018).

Quant à la biodégradabilité, le PLA ainsi que le PVA sont biodégradables contrairement à l'ABS. Il existe également beaucoup d'autres matières utilisables comme par exemple des filaments à base de bois, de métal ou encore de pierres (McMills, 2018).

1.2.3. Fichier digital

Outre la matière première, un fichier digital est nécessaire afin de réaliser une impression en 3 dimensions. Il existe différentes possibilités pour obtenir un tel fichier digital.

La première possibilité consiste à surfer sur internet. Certains sites internet proposent des modèles numériques, prêts à l'emploi, pouvant être gratuits ou payants. Un bon exemple de base de données relativement importante comportant certains modèles déjà testés et gratuits est « Thingiverse ». Cette base de données est mise au point par « MakerBot Industries », un producteur américain d'imprimantes 3D. Prenons comme exemple une jeune française née avec une malformation au niveau du bras qui a pu bénéficier d'une prothèse imprimée en trois dimensions. Cette prothèse a été fabriquée par un de ses voisins, propriétaire d'une imprimante en trois dimensions. Grâce à une association américaine qui a rendu disponible sur internet, en « open source » et sans le moindre frais, le fichier digital nécessaire, l'impression a pu être réalisée. Le délai total pour profiter de sa prothèse a atteint 30 jours. Ce délai comprend le temps de prises de mesures et d'impression de la prothèse (J.-B.P., 2019). Cet exemple n'est pas le

seul de ce type. Effectivement, d'autres personnes ont également pu bénéficier gratuitement de prothèses customisées.

Une autre technique appelée la photogrammétrie, permet, sur base de photos prises d'un objet, de créer une modélisation en trois dimensions de ce dernier. A cette fin, plusieurs prises de vue différentes et adéquates sont nécessaires afin de capturer le plus de détails possible et de permettre le calcul des différentes mesures (McMills, 2018). De plus, certains scanners 3D permettent également de prendre l'empreinte d'un objet à répliquer (Arte, 2014). Le fichier digital qui en résulte divise l'objet à imprimer en différentes couches qui seront imprimées par l'imprimante 3D (Kalaskar, 2017).

Pour finir, une autre façon d'obtenir ce fichier numérique requiert l'utilisation d'un programme de design appelé « Computer-Aided Design » (CAD) en anglais ou « Conception Assistée par Ordinateur » (CAO) en français. Différents types de programmes sont à disposition des utilisateurs. Ces programmes permettent la création d'un design directement depuis un ordinateur personnel (Films Media Group & Österreichischer Rundfunk, 2013). En plus de fournir des solutions entièrement personnalisables, un tel logiciel laisse également libre cours à la créativité. Le premier logiciel 3D fut inventé en 1957. Comme exemple de logiciel, nous retrouvons Catia dont le nom vient de « Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée ». Ce logiciel est toutefois onéreux et exige une certaine expérience. Un autre logiciel plus abordable est SolidWorks. Ce ne sont que deux noms cités parmi de nombreuses possibilités (Voets, 2019).

Un logiciel d'optimisation est nécessaire car, pour une impression optimale, il y a certaines contraintes à respecter. Prenons par exemple un arbre dont les branches ne peuvent pas se trouver à plus de 45 degrés du tronc. Si tel est le cas, un support doit être imprimé en dessous des branches pour éviter des problèmes d'impression (McMills, 2018). Un logiciel d'optimisation permet également d'économiser la quantité de matière utilisée et donc, apporte un gain de poids considérable. Ce dernier peut, dans certains cas, même aller jusqu'à 90%. Enfin, le recours à un logiciel d'ingénierie assistée par ordinateur (IAO) ou « Computer-Aided Engineering » en anglais (CAE) sert de vérification du respect des contraintes et de l'optimisation. Autrement dit, ce logiciel vérifie que le fichier 3D est viable. Par exemple, il permet, via une simulation, de vérifier que la pièce s'injecte correctement et que lorsque les pièces se referment, la température soit dans les normes afin d'éviter les points faibles (Voets, 2019).

La composition du fichier digital nécessite de posséder un fichier reprenant différentes vues de l'objet. Par après, une conversion de cette vue en différentes couches successives est utilisée pour définir la marche à suivre ainsi que la vitesse de mouvement de la tête d'impression lors de l'impression en trois dimensions. Cette conversion est effectuée par un logiciel spécifique nommé « Slicer ». Ce fichier définit ensuite la succession des actions réalisées par la machine et nécessaires à la fabrication du design ainsi créé (Pêcheux, s.d.).

1.3. Techniques d'impression

Il existe différentes techniques d'impression. Elles sont regroupées en sept familles distinctes. Certaines se basent sur l'extrusion, d'autres sur le « material jetting » ou la projection de matière en français. Les autres familles de techniques d'impression tridimensionnelle sont la projection de liant ou « binder jetting » en anglais, le laminage ou « sheet lamination » en anglais, la photopolymérisation, la fusion sur lit de poudre ou « powder bed jetting » en anglais et enfin le « direct energy deposition » (Voets, 2019).

La matière première et ses caractéristiques ainsi que d'autres composantes définissent les propriétés de l'impression (Kalaskar, 2017).

Toutes ces techniques sont pratiquées et préférables dans divers cas mais certaines statistiques indiquent que des techniques sont plus utilisées que d'autres, comme l'impression par dépôt de matière fondue qui était la plus utilisée en 2017 et en 2018. Suivent ensuite, le frittage sélectif par laser et la stéréolithographie. Le laminage par dépôt sélectif se retrouve dans la catégorie des techniques ayant le moins de succès. Ces chiffres sont issus d'enquêtes statistiques menées auprès d'ingénieurs et de CEO (Statista, 2019).³

1.3.1. Photopolymérisation

La première technique d'impression en trois dimensions inventée est la **stéréolithographie (SLA)** mise au point par l'américain Charles W. Hull (Kalaskar, 2017). Elle exploite une source de lumière pour renforcer une résine acrylique liquide qui peut être entièrement transparente (Films Media Group & Österreichischer Rundfunk, 2013). La résine se durcit sur une plateforme au contact des photons présents dans la lumière laissant les parties non exposées intactes. Plus la couche est fine, plus la qualité de l'objet créé sera grande (Kalaskar, 2017). La plateforme descend ensuite pour permettre l'impression d'une seconde épaisseur juste au-dessus de la précédente et ainsi de suite. C'est précisément ce processus qui est appelé la photopolymérisation. La source de lumière peut différer : elle peut provenir d'un laser ultraviolet ou d'un projecteur (McMills, 2018). La stéréolithographie assure une surface lisse à l'objet et une très bonne qualité. En comparaison avec les techniques suivantes, la SLA reste onéreuse mais elle est la méthode la plus adéquate dans le cas de pièces de grande taille (Kalaskar, 2017).

³ Voir Annexe n°2

La résolution étant limitée par la taille du laser, une technique plus récente, appelée **la microstéréolithographie (MSL)**, est identique à la stéréolithographie. La seule différence réside dans le fait que le laser possède un diamètre plus petit, ce qui apporte une résolution plus élevée (Kalaskar, 2017).

Ensuite, la technique **CLIP (Continuous Liquid Interface Production)** utilise la photopolymérisation. En plus d'une source de lumière, de l'oxygène est utilisé pour empêcher la résine de se coller sur la fenêtre au-dessus de laquelle vient se poser l'objet solidifié (Lansard, 2018).

De plus, la technique de **traitement numérique de la lumière ou Digital Light Projection (DLP)** se base également sur la photopolymérisation. Contrairement à la SLA où l'impression se fait par point, l'impression par DLP se fait directement en une seule couche. Un projecteur de laser projette la forme de la couche sur la résine afin qu'elle se solidifie (Kalaskar, 2017).

1.3.2. Extrusion

Cette technique d'impression, inventée par Scott et Lisa Crump, un couple américain, utilise le dépôt de matière, c'est-à-dire un extrudeur atteignant plus ou moins 200 degrés Celsius pour faire fondre un filament de plastique (Hood-Daniel & Floyd Kelly, 2011). Ce filament de plastique est ensuite imprimé sur une surface plane. Cette technique est appelée **l'impression par dépôt de matière fondue (FDM)** ou « Fused Filament Fabrication » en anglais (Evans, 2012). Le plastique est chauffé et est déposé par la tête d'impression couche par couche (Films Media Group & Österreichischer Rundfunk, 2013). Les couches durcissent instantanément lors du refroidissement de la matière plastique. La surface plane descend ensuite d'un niveau afin de permettre l'impression de la seconde couche (McMills, 2018). Le résultat peut varier en fonction de la qualité des matières premières et des parties mécaniques de la machine (Pêcheux, s.d.). Celle-ci apporte une précision moindre que la stéréolithographie qui offre la possibilité d'intégrer un niveau de détail très précis (McMills, 2018). Le prix d'utilisation d'une telle imprimante est moins élevé que les autres procédés. Certaines techniques comme le « bioplotting » sont dérivées de l'impression par dépôt de matière fondue (Kalaskar, 2017).

1.3.3. Projection de matière

Il existe également une version plus industrielle mélangeant le processus des imprimantes à jet d'encre, où la résine est stockée dans une cartouche, et de la stéréolithographie. La technique de **PolyJet** consiste donc à imprimer goutte par goutte la résine sur une plateforme et ensuite à durcir la couche entière à l'aide d'une source de lumière (McMills, 2018). La technique de PolyJet, faisant partie des techniques basées sur des gouttelettes, n'est malheureusement pas utilisable pour des impressions en petit nombre. En effet, même si les créations sont de qualité, une telle imprimante est très onéreuse. Les techniques de **jet d'encre continu (CIJ)**, de la **goutte à la demande (DOD)** diffèrent de la technique PolyJet uniquement par la génération du flux de gouttes. Il existe encore d'autres techniques moins connues dans la famille de la technique PolyJet (Kalaskar, 2017). Mais ce sujet ne sera pas abordé dans le cadre de ce travail.

1.3.4. Projection de liant

Enfin, pour **l'impression par liage de poudre**, aussi appelée **Binder Jetting (BJ)** le processus se fait toujours couche par couche mais cette fois c'est une poudre qui est fixée par un liant tel que la colle (Arte, 2014). Un jet d'encre peut également être ajouté pour apporter de la couleur à l'objet créé. Le processus se déroule comme suit. La colle est imprimée suivant le design souhaité sur une réserve de poudre. Cette colle se solidifie rapidement afin de pouvoir procéder à l'impression de la couche suivante (McMills, 2018). La poudre peut être issue de polymère, de métal ou de céramique. Les formes pouvant être imprimées sont diversifiées et peuvent atteindre une complexité étonnante. Un processus de frittage est néanmoins généralement nécessaire pour solidifier l'objet créé (Kalaskar, 2017).

1.3.5. Sheet lamination

La **fabrication d'objet par laminage (LOM)** aussi appelée **laminage sélectif par dépôt (SDL)** est la méthode d'impression en trois dimensions la plus récente puisqu'elle date de 2005. Elle fut mise au point par une entreprise irlandaise nommée « Mcor Technologies ». Elle consiste à découper couche par couche des planches ordinaires et à les lier entre elles au moyen d'une colle. Il est ensuite nécessaire de retirer l'excédent manuellement (McMills, 2018). Ces planches peuvent être en bois, en métal ou encore en mousse. Cette technique est idéale dans le cas d'impression d'objets de grandes dimensions (Voets, 2019).

1.3.6. Fusion sur lit de poudre

Dans cette famille de techniques, se trouve la technique du **frittage sélectif par laser (SLS)**. L'inventeur de cette technologie est l'américain Carl R. Deckard. Le matériel utilisé dans cette technique est une poudre qui est fixée par un laser. Une épaisseur de poudre fine permet la création d'un objet de meilleure qualité que lorsque la poudre est plus épaisse (Kalaskar, 2017). La poudre fine est chauffée à 180 degrés Celsius et est fusionnée couche par couche par le laser. Ce processus peut prendre entre quelques secondes à quelques minutes en fonction du temps d'exposition au laser (Films Media Group & Österreichischer Rundfunk, 2013).

Les matières premières sont diverses (Pêcheux, s.d.). C'est généralement une poudre de métal qui est utilisée (Kalaskar, 2017). Mais, selon McMills, « presque toute matière pouvant être transformée en fine poudre peut servir de matière première ». Par exemple, il est possible d'imprimer via cette technique en utilisant une poudre de céramique, de plastique, de verre, de sable, de métal ou encore de ciment (McMills, 2018). Le **frittage laser métal (SLM)** suit le même principe que le SLS mais contrairement à celui-ci la poudre est fondue plutôt que fusionnée. L'impression par **fusion de faisceau d'électrons (EBM)** se base également sur le SLS, à ceci près que la source est un faisceau d'électrons. Ces techniques apportent une mauvaise précision, ce qui implique qu'un objet imprimé nécessite d'être traité après son impression afin d'assurer une solidité de l'objet (Kalaskar, 2017).

Enfin, selon le site Stratasys, le **MultiJet Fusion (MJF)** est une technique de fusion sur lit de poudre. Le principe se base sur l'impression d'un liant comme de la colle sur une couche de matière première. Cette matière est fusionnée directement lors de l'impression (Sculpteo, s.d.).

1.3.7. Direct Energy Deposition

La technique de **Direct Energy Deposition (DED)** consiste à projeter de la poudre à travers un laser. Ensuite, une étape de rechargement peut se produire. Grâce à cette technique, des objets bi-matières ou tri-matières sont réalisables (Voets, 2019).

1.4. Inventions dérivées

Il existe certaines inventions semblables à l'impression en trois dimensions. Par exemple, le stylo 3D représente une sorte d'imprimante en trois dimensions portable. Son fonctionnement est sensiblement identique à l'imprimante en trois dimensions (McMills, 2018). Les couches successives sont néanmoins oubliées. En effet, un filament de plastique est utilisé. Lors de la création d'un objet, le filament est fondu et se fige directement à l'air libre. Ce processus, semblable à l'impression par dépôt de matière fondue, permet de supprimer l'étape de succession de couches (Arte, 2016). La différence avec les imprimantes 3D est qu'aucun fichier digital n'est nécessaire. Les stylos 3D permettent également d'apporter certaines corrections à des objets créés à partir d'une imprimante 3D et donc évite de devoir recommencer l'impression (McMills, 2018).

Une autre invention dérivée a fait son apparition il y a quelques années. Une start-up, Suttrue, a créé en 2017, une imprimante 3D qui a pour vocation de suturer différentes plaies. Ceci rendrait l'opération plus sûre et efficace (Kalaskar, 2017).

1.5. Législation

Il n'y a pas encore de loi concernant les imprimantes 3D. Mais certaines plateformes fournissent gratuitement toutes les données nécessaires à l'impression. A l'aide du fichier digital, il est donc possible d'imprimer n'importe quel objet disponible (Films Media Group & Österreichischer Rundfunk, 2013). Il est donc opportun de savoir si les réglementations actuelles sont à même de gérer l'expansion de cette technique innovatrice (Malaty & Rostama, 2017).

Plusieurs droits de la propriété intellectuelle sont concernés, à savoir le droit d'auteur, le droit des dessins et des modèles industriels, le droit des brevets et le droit des indications géographiques (Malaty & Rostama, 2017). Ces différents droits protègent chacun différents aspects. Tandis que le droit des dessins et modèles industriels apporte une protection du design d'un objet ou seulement une partie de celui-ci, le droit d'auteur protège une invention originale (SPF Economie, 2018).

La question est donc de savoir si les lois en vigueur intègrent ces droits. Le droit d'auteur permet à l'auteur de réclamer des dédommagements si quelqu'un imprime sa création sans autorisation, que celle-ci soit issue de l'impression 3D ou non. Le design créé est également protégé par le droit sur les dessins et modèles industriels. Les deux derniers droits en question protègent

également l'auteur. En effet, le droit des brevets assure une protection de la façon d'atteindre l'utilité de l'objet, tandis que le droit des indications géographiques protège la distinction de l'objet avec la concurrence. Ceci ne concerne toutefois pas un particulier qui peut imprimer un objet sans autorisation s'il l'utilise uniquement à des fins privées comme le stipule la loi européenne (Directive 2008/95/CE, article 5). Selon la loi, l'auteur peut réclamer des dommages lorsqu'un particulier imprime un objet sans son autorisation et le vend par la suite. Ceci est vrai uniquement dans certains pays. En effet, d'autres pays requièrent un paiement avant l'exécution de l'impression. Il reste à voir si une redevance sera appliquée dans le cas de l'impression 3D. L'auteur peut néanmoins imposer un paiement pour avoir accès au fichier digital. Il existe aussi des sites qui fonctionnent sur base d'un système d'abonnements mensuels (Malaty & Rostama, 2017).

2. Définition des concepts

2.1. Computer-Aided Design

Le Computer-Aided Design désigne une technologie utilisée dans le designing de produit. Elle permet également la création de documents expliquant la marche à suivre lors du designing du produit concerné. Les documents produits peuvent être de deux dimensions ou de trois dimensions (Techopedia, s.d.).

2.2. Extrudeur

Un extrudeur est une machine servant à l'extrusion de différentes matières comme le métal, le plastique et l'argile (Collins Dictionary, s.d.). L'extrusion consiste à « *faire sortir* » une matière de l'extrudeur (Collins Dictionary, s.d.). Les matières sont fluidifiées grâce à la pression exercée par la vis hélicoïdale tournant à vitesse moyenne dans cette machine (Encyclopædia Universalis, 2019). La machine est composée d'un cylindre en métal dans lequel tourne ladite vis (Larousse, s.d.).

2.3. Filament

La matière première pour l'impression en trois dimensions est commercialisée sous forme de bobine de filament, c'est-à-dire de forme fine et allongée, selon le Larousse (s.d.).

2.4. Frittage laser

Le frittage laser est une technique d'impression en trois dimensions consistant à chauffer la matière première via un laser. Cette matière première peut être du plastique, du métal, de la céramique ou le verre (Sculpteo, s.d.).

2.5. Impression

Selon le dictionnaire Larousse (s.d.), l'impression consiste à transformer un fichier digital en une copie ou un objet tangible.

2.6. Impression 3D

L'impression 3D est également appelée fabrication additive. La fabrication additive peut être réalisée à partir de plastique, de résine ou de métal. Cette sorte d'impression consiste à imprimer par couches successives un objet tangible. La matière est fondue ou fusionnée et déposée sur la

couche précédente avant de se solidifier (Pêcheux, s.d.). Le terme « trois dimensions » signifie que la machine se base sur trois axes distincts pour fabriquer l'objet (Mongeon, 2016).

2.7. Impression par dépôt de matière fondue

Cette technique d'impression en trois dimensions utilise un filament de plastique fondu par un extrudeur. Le plastique fondu est ainsi déposé couche par couche sur une surface plane, la couche inférieure se durcissant avant le dépôt de la couche suivante (Hood-Daniel & Floyd Kelly, 2011).

2.8. Impression par liage de poudre

L'impression par liage de poudre est une technique de fabrication additive. La matière première utilisée est une poudre qui sera fixée par un jet mélangeant de l'encre et de la colle (Kalaskar, 2017).

2.9. Internet des objets

L'internet des objets ou Internet of Things (IoT) représente la connexion des objets utilisés quotidiennement avec internet. Cette connexion se déroule par exemple « *via WiFi ou Bluetooth et par le biais de codes-barres ou d'étiquettes RFID (Radio Frequency Identification) appliqués sur l'objet* ». Par exemple, les montres connectées font partie de l'IoT (SPF Economie, 2018).

2.10. Stéréolithographie

La stéréolithographie est une technique d'impression en trois dimensions qui consiste à renforcer une résine acrylique liquide via un laser ultraviolet (Kalaskar, 2017).

3. Impacts

Comme annoncé précédemment, la question de recherche a pour vocation de comprendre quels sont les impacts positifs et négatifs qu'apporte l'impression en trois dimensions dans le secteur médical. Nous allons énoncer les avantages applicables quel que soit le secteur. Ensuite, nous parcourons les différents impacts de l'impression 3D dans différents secteurs. Citons, par exemple, le secteur artistique ou le secteur aérospatial.

Pour commencer, utiliser l'impression tridimensionnelle apporte, en général, un potentiel technologique sans limite, un potentiel économique vu que de nouveaux business models se créent et un potentiel écologique de par la nature même de la fabrication additive qui nécessite moins de matière première pour arriver à l'objet fini (Voets, 2019).

De plus, utiliser l'impression 3D est généralement plus rapide et plus fiable. Ceci est un avantage non-négligeable puisque le produit fini est de meilleure manufacture et disponible plus rapidement (Voets, 2019).

Ensuite, un gain de poids se fait également ressentir : moins de matière première est utilisée ce qui réduit le poids. Par exemple, une entreprise de mise en bouteille a décidé de changer une pièce d'usure très lourde et onéreuse. Grâce à l'impression 3D, après optimisation, le poids se voit diminuer de presque 93% en comparaison avec la pièce d'origine. Le poids passe de 2,382 kilogrammes à 0,174 kilogrammes. La matière qui, de base était de l'inox, est maintenant du polyamide. Le prix moyen de fabrication de la pièce est également impacté : il passe de 260 euros à 90 euros (Voets, 2019).

Pour finir, utiliser l'impression en trois dimensions implique une probabilité d'erreur plus faible. En effet, avoir recours à l'impression tridimensionnelle permet d'imprimer une pièce rapidement en polymère afin de vérifier que tout soit parfait avant l'impression définitive (Voets, 2019).

Passons maintenant aux avantages spécifiques à chaque secteur et aux utilisations possibles de l'impression tridimensionnelle dans ces secteurs.

3.1. Secteur artistique

Le secteur artistique se voit révolutionner par la fabrication additive. Cette technologie ouvre de nouveaux horizons et de nouvelles techniques de création. Elle peut également être utilisée en parallèle de la création artistique habituelle. L'art digital permet de pouvoir recommencer une œuvre ou d'annuler la dernière action effectuée, ce qui est impossible dans l'art traditionnel. De plus l'espace de stockage nécessaire est nettement moindre. L'art digital est néanmoins critiqué vu que les outils utilisés changent, contrairement aux outils utilisés dans l'art manuel. En effet, la technologie évolue ce qui rend les outils obsolètes et nécessite de les upgrader. Il est également nécessaire de se former à l'utilisation de ces nouveaux outils, ce qui implique d'y accorder du temps (Mongeon, 2016).

La fabrication additive permet de rendre l'art accessible à tout le monde : elle permet d'ajouter une dimension aux photos. Cette dernière les rendrait « visibles » pour des personnes malvoyantes par exemple. Ces personnes pourraient donc toucher les photos et se créer une image mentale de la photographie. Ce projet fut lancé par un photographe qui peu à peu perdait la vue. Autre avantage : les sculpteurs ayant par exemple des problèmes de dos pourraient utiliser l'impression en trois dimensions pour les soulager mais en leur laissant la possibilité d'exprimer leur art (Mongeon, 2016).

La création artistique utilisant l'impression en trois dimensions nécessite le calcul de lois mathématiques calculant notamment les coordonnées sur les différents axes. Néanmoins, l'art issu de la fabrication additive ne nécessite pas d'avoir des compétences développées en géométrie parce que les coordonnées sont calculées automatiquement par le logiciel de création utilisé. De plus, un logiciel de typologie est un logiciel d'aide permettant de définir les formes géométriques, généralement le carré, recouvrant la surface de la création. Plus cette typologie sera précise et donc composée d'un grand nombre de carrés, plus la création sera de qualité (Mongeon, 2016).

L'impression en trois dimensions est utilisée dans la sculpture depuis une trentaine d'années. La première exposition d'art dévoilant des créations imprimées en trois dimensions d'artistes comme Bruce Beasley eut lieu en 2008 (Mongeon, 2016).

Enfin, l'imprimante 3D permet d'imprimer des répliques exactes d'une œuvre. Par exemple, une statue, après scannage et mesurage au laser, peut être répliquée à chaque détail près (Films Media Group & Österreichischer Rundfunk, 2013).

3.2. Secteur commercial

L'impression 3D va également avoir un impact considérable sur le secteur commercial. En Allemagne, un magasin propose des imprimantes 3D à la vente. Il propose également d'imprimer sur place des objets en tout genre. Les clients peuvent venir avec les plans ou l'objet cassé qu'ils souhaitent reproduire. C'est ce qu'on appelle de la customisation de masse. Il existe des sociétés qui proposent d'imprimer des objets pour des personnes ne possédant pas cette technologie. Ces sociétés se basent sur un fichier digital créé par le client. Lorsque l'impression est finie, l'objet est expédié chez le client (McMills, 2018). Un autre exemple est une start-up américaine qui offre aux enfants un service de création et d'impression de leur poupée (Arte, 2014). L'impression en trois dimensions permet, en plus, d'imprimer des pièces cassées d'un objet qui n'est plus commercialisé. Ceci est contradictoire avec la société de consommation actuelle et n'incite donc pas à l'achat mais plutôt à la réutilisation et à la récupération (Walker, 2013).

La photographie se voit également bouleversée. En effet, une photographie peut prendre une dimension supplémentaire. Un tel projet fut lancé par la société Doob fondée en 2013. Elle permet à ses clients de créer une figurine à leur propre effigie ou à celle d'un groupe de personnes. Cette figurine est créée via la photogrammétrie sur base de photos prises dans une cabine disposant d'une cinquantaine de caméras. Le principe ressemble donc à un shooting photo mais le résultat est tout autre. Les figurines peuvent avoir différentes utilités. Malheureusement, elles souffrent d'un manque de solidité et sont donc souvent employées comme éléments décoratifs (Kurutz, 2018).

L'impression en trois dimensions de vêtements est également en cours de lancement. Il est ainsi possible d'imprimer un t-shirt ou encore une robe à l'aide d'une imprimante 3D. La matière actuelle utilisée pour l'impression de vêtements est un plastique flexible. Certaines entreprises ont donc projeté de développer une matière proche du coton, plus fluide que la matière utilisée actuellement. Une des premières marques y ayant eu recours est « Pringle of Scotland ». Cette marque écossaise de vêtements a utilisé, en 2014, l'impression en trois dimensions lors de la création de sa collection. Ils ont utilisé du nylon comme matière première (McMills, 2018).

Outre les vêtements, la personnalisation des chaussures est nécessaire au bon fonctionnement d'un commerce. Ainsi, il est également possible depuis août 2018 d'imprimer ses baskets à domicile. Nike, une marque d'équipements sportifs, a lancé la possibilité de créer le design de

sa chaussure en ligne. Un patron peut ensuite être imprimé en trois dimensions. Le résultat est sans appel. Une diminution du délai de livraison est observée. Les particuliers n'étant pas encore tous propriétaires d'une imprimante 3D, les Nike Stores pourraient réaliser ce processus pour les clients. Adidas, une autre marque d'équipements sportifs, propose à ses clients d'imprimer des semelles personnelles et adaptées à la morphologie de chaque client (Barbin, 2018).

3.3. Secteur agroalimentaire

Tout d'abord, l'impression en trois dimensions permet de réaliser des moules au design unique. Ceci permet de donner à la préparation une forme presque incopiable. L'impression en trois dimensions permet de customiser certains produits comme des gâteaux ou encore des biscuits. Une entreprise belge fabriquant des spéculoos avait déjà offert à ses clients la possibilité de personnaliser sa commande. Afin de réaliser cette action, ils sous-traitaient auprès d'un spécialiste de l'impression 3D. L'engouement était tel qu'ils ont dû se procurer une imprimante 3D pour éviter la sous-traitance (FP, 2019).

Certaines imprimantes 3D adaptées peuvent réaliser des plats en tout genre allant des pâtes au chocolat. Le plat ou les aliments étant imprimés, il faut néanmoins encore cuire l'impression si cela est nécessaire. La technique généralement utilisée dans le cas d'impression alimentaire en trois dimensions est l'impression par dépôt de matière fondue où le filament est remplacé par un filament comestible (Renard, 2019).

La complexité des plats créés ainsi que la possibilité de créer n'importe quelle forme possible sont des avantages de l'impression 3D dans le secteur agroalimentaire. De même, la possibilité de donner n'importe quelle forme à des aliments va permettre de dénaturer la forme de l'aliment de base afin de lui donner une forme plus appétissante ou ludique. C'est-à-dire qu'un chicon sera plus apprécié sous la forme d'une fleur que sous sa forme initiale. La possibilité de personnaliser chaque menu en fonction des besoins de chacun constitue un énième avantage. Enfin, autre avantage mais pas des moindres, le nombre de déchets annuels se verrait diminué. Etant donné que la matière première n'est pas utilisée sous sa forme initiale, il n'est pas nécessaire qu'elle rentre dans certains critères de perfection (Renard, 2019).

Certaines entreprises ont déjà mis au point des imprimantes destinées à l'impression en trois dimensions d'aliments et de repas. Les sociétés « 3D Systems » et « Natural Machines » proposent respectivement la « ChefJet » et la « Foodini ». Une autre société a développé une

imprimante à pizzas prêtes à cuire, projet développé en collaboration avec la NASA afin de procurer une nourriture plus conséquente aux astronautes. La NASA étudie cette possibilité depuis 2006. Enfin, Biozoon est destinée à faciliter la tâche des cuisines des maisons de repos puisqu'elle permet d'adapter les repas à chaque patient tout en ayant la consistance et les propriétés adéquates (Renard, 2019).

Une imprimante 3D adaptée permet la création et cuisson de crêpes personnalisables prenant n'importe quelle forme. Un morceau de sucre peut également prendre des formes particulières ainsi que des couleurs spécifiques grâce à l'impression en trois dimensions (McMills, 2018).

3.4. Secteur industriel

Dans l'industrie, l'impression 3D est une bonne source pour vérifier que toutes les exigences du produit sont rencontrées avant de lancer la production de masse (Films Media Group & Österreichischer Rundfunk, 2013). Ainsi il est possible de réaliser un prototype rapidement et à un coût relativement bas (Kalaskar, 2017). Un gain se fait également ressentir quant à la quantité de matière nécessaire pour produire un objet (RTBF, 2018).

Dans l'industrie robotique, un robot nommé « Roboy » à l'allure humaine a vu le jour grâce à l'imprimante 3D. L'impression 3D a été utilisée pour produire 80% de ses différentes parties. Les techniques utilisées pour imprimer Roboy sont innovatrices. Auparavant, si une main de robot devait être imprimée, elle devait l'être en plusieurs pièces et assemblée par la suite. Les jointures ne pouvaient être directement imprimées. Mais les mains de Roboy sont imprimées en une seule pièce et celles-ci offrent un mouvement des doigts (Films Media Group & Österreichischer Rundfunk, 2013).

L'imprimante 3D peut également être utilisée afin de protéger un certain savoir-faire. Cela permet d'imprimer un prototype ou certaines parties entrant dans le processus de fabrication. Tel est le cas pour des fabricants d'avions ou encore de voitures. La première voiture dont le châssis a été produit avec cette technologie est « Urbee ». Aux Etats-Unis, des armes à feu ont pu être imprimées et le programme nécessaire pour l'impression était disponible gratuitement sur internet (Films Media Group & Österreichischer Rundfunk, 2013).

L'imprimante 3D révolutionne également l'industrie automobile vu qu'elle peut être utilisée pour imprimer certains modules des voitures produites. Une marque adepte de cette technique est BMW. En effet, cette technique est utilisée au sein de sa chaîne de production depuis 2008.

Ce processus permet une production beaucoup plus rapide. Le matériel utilisé pour compléter ces voitures est un mélange de plastique et de métal. Pour illustrer le propos, un rail permettant l'ouverture d'une portière ne prend qu'un peu moins de quinze minutes à être imprimé. Un autre exemple de parties imprimables est la pompe à eau utilisée dans des voitures de circuit BMW. Quant au nombre de parties produites depuis cette date, il a atteint un million l'année dernière. Ces pièces imprimées sont utilisées dans différentes séries de la marque. Ce nombre devrait encore augmenter dans les années à venir. Une autre marque adepte de ce concept est Rolls-Royce. La marque n'en est pas encore au même stade que BMW mais elle utilise déjà l'impression 3D pour produire dix modules de leurs voitures (Mechanical News & Products, 2019).

Les commandes sont parfois particulières et les clients peuvent avoir certains souhaits quant au design de leur véhicule. L'impression 3D permet de satisfaire ces demandes en permettant aux clients de personnaliser eux-mêmes leur voiture via l'utilisation d'un webshop. Les pièces ainsi personnalisées sont ensuite imprimées en trois dimensions (Mechanical News & Products, 2019).

De plus, l'impression 3D influencera aussi la production des motocyclettes. De nombreux éléments peuvent être imprimés via la technologie 3D. Il était auparavant possible de ne produire que des roues via cette technologie. Ces roues ne contenaient pas d'air. Maintenant, la structure de la moto peut également être imprimée en utilisant des filaments PRO Flex TPU thermoplastiques polyuréthanes (Zart, 2019). Le prix de cette moto au design très futuriste, quoi que pour le moment pas encore disponible à la vente, est de 2.600 dollars, soit environ 2.300 euros. Cette moto comporte certaines caractéristiques de formes qu'il aurait été impossible de créer sans l'impression 3D (Christian, 2019).

3.5. Secteur de la construction

Dans le secteur de la construction, des imprimantes 3D de plus grande envergure permettent de construire certains bâtiments. Du béton peut être utilisé comme matière première (Arte, 2014). En Chine, la construction d'un pont en béton grâce à cette technologie n'a duré que 19 jours. Le nombre d'ouvriers nécessaires ainsi que le budget engagé dans ce projet étaient nettement moindres que dans le cas d'une construction classique (J.C., 2019). Des maisons peuvent également être imprimées en 3D. Tel est le cas, toujours en Chine, où un mélange de béton et de débris de chantiers sert d'encre afin d'imprimer une maison en un jour et à faible prix, environ 7.000 euros (Arte, 2015).

Une autre technique, utilisée à Amsterdam, qui consiste à utiliser une encre spéciale mélangeant du plastique biodégradable issu du colza et de l'encre, est utilisée pour construire chaque pièce d'une maison. Les pièces sont ensuite assemblées et peuvent être renforcées en injectant du béton dans des alvéoles prévues à cet effet afin de connecter toutes les pièces ensemble. La construction de cette maison a pris deux ans et demi mais les prévisions sont, à terme, d'imprimer les maisons en un mois (Arte, 2015). La société DUS a imprimé en trois dimensions une maison de petite taille située à Amsterdam le long des canaux. Les avantages sont multiples comme, par exemple, une bonne isolation ou encore la possibilité de réutiliser la matière première par la suite. Le but de cette œuvre, formée de bioplastique, est de fournir des solutions de petite taille et disponibles rapidement (Kwok, 2016).

L'influence de l'impression 3D se fait également sentir dans l'architecture. En effet, des maquettes peuvent être imprimées avec une très grande précision (Arte, 2014). Les maquettes sont réalisées dans des délais beaucoup plus courts que lorsqu'elles étaient faites manuellement. La précision de ces maquettes est également nettement meilleure que celle des maquettes ordinaires (Arte, 2015).

3.6. Secteur militaire

Utilisée au sein d'une mission terrestre, l'impression 3D permet la réparation et le remplacement de certains objets ou parties d'objets cassés en un temps record et à un prix nettement moindre que s'il fallait attendre la livraison de l'objet en question (Burke, 2019). Premier exemple, lors d'un exercice de l'armée de terre américaine, des véhicules nécessitaient des réparations. Grâce à l'intervention des techniciens de l'unité s'occupant de l'impression en trois dimensions, ces réparations ont pu être effectuées en peu de temps. Les imprimantes 3D permettent également de réparer les véhicules ou autres peu importe l'endroit où se déroule l'exercice. Deuxième exemple, lorsque le système d'eau d'une unité est endommagé, la livraison d'une nouvelle pièce dure parfois jusqu'à un an. Cette longue période d'attente empêche l'unité de travailler ou oblige l'armée à affecter certaines personnes au ravitaillement de l'unité en question. L'impression 3D peut pallier cette situation en un temps record et à faible coût. Pour finir, l'impression 3D permet au soldat d'adapter leurs armes à la forme de leurs mains et d'y ajouter des accessoires, améliorant leur confort lors de missions (Egnash, 2018).

L'Armée de l'air bénéficie également de l'utilisation de la fabrication additive. La réparation de train d'atterrissage d'un F-35B par cette méthode est un exemple concret (Burke, 2019). La technique d'impression utilisée était ici l'impression par liage de poudre, avec comme matière première une poudre de titane (Svan, 2019). Cela a permis d'éviter la commande du train d'atterrissage dans son ensemble et ainsi d'économiser pas mal d'argent. Il ne faut également pas attendre un certain nombre de jours pour être livré (Burke, 2019). Il en va de même pour la maintenance de la flotte aérienne. Des kits ont été créés. Ils contiennent des objets tels que des clips et bouchons en plastique imprimés qui permettent de protéger les moteurs, nécessitant des réparations et de ce fait, d'éviter d'éventuelles fuites. L'obligation d'envoyer une équipe pour sécuriser le transport des moteurs ne se fera donc plus sentir. La sécurité des équipes est ainsi assurée étant donné qu'elles ne doivent plus se rendre dans des milieux jugés hostiles (Bolinger, 2019).

L'armée américaine a, pour la première fois, accepté que le producteur de F-22 utilise une pièce métallique, servant de fixation, produite grâce à l'impression en trois dimensions. Si tous les tests se déroulent correctement, cette pièce devrait être utilisée dans tous les avions F-22. De plus, l'installation de pièces imprimées en trois dimensions pourrait se généraliser. Elle permettrait de diminuer le temps de production nécessaire (Svan, 2019).

3.7. Secteur aérospatial

L'utilisation de la fabrication additive dans l'aéronautique est envisagée depuis une vingtaine d'années (Committee on Space-Based Additive Manufacturing & Aeronautics and Space Engineering Board, 2014). Lorsque des pièces de rechange sont indispensables, les parties nécessaires peuvent être imprimées sur la Terre et envoyées dans l'espace (Gaget, 2017). Grâce à l'impression en trois dimensions, la production d'éléments de remplacement servant à réparer certaines parties abimées ou cassées pourrait également être réalisée en orbite. Les possibilités sont envisagées et des prototypes sont testés. Une présence humaine ainsi que de l'énergie restent pour le moment presque indispensable pour bouger certaines pièces ou juste pour superviser la bonne construction de l'objet (Committee on Space-Based Additive Manufacturing & Aeronautics and Space Engineering Board, 2014).

Les avantages de l'impression en trois dimensions sont des coûts réduits, une performance améliorée et une réduction du temps de production. Néanmoins, l'évolution de cette technologie ne va pas de pair avec la technologie utilisée sur Terre et requiert une recherche spécifique (Committee on Space-Based Additive Manufacturing & Aeronautics and Space Engineering Board, 2014).

En 2018, un projet nommé « Archinaut » a été lancé. Il consiste à créer une imprimante 3D utilisable dans la station spatiale internationale pour imprimer des satellites. L'imprimante est composée de bras mécaniques qui assemblent toutes les parties (Gaget, 2017).

L'impression 3D permettrait aux missions spatiales lunaires de décoller avec un poids nettement moindre, ce qui entraînera également un coût minimum. En effet, les habitations pourraient être fabriquées à partir d'une impression incluant du sable lunaire (Arte, 2015).

Il est important que la matière première soit plus résistante que celle employée sur Terre. Certains plastiques ne sont pas assez résistants. Il est impératif que le matériel supporte une température extrême. Sur Terre, les plastiques utilisés sont le PLA, le PVA, le PEI (polyétherimide) ou encore le PC (polycarbonate). Seuls le PEI et le PC sont utilisables dans l'espace. Il est néanmoins possible de commencer l'impression sur Terre et de la poursuivre dans l'espace. Le métal, qui supporte mieux la chaleur que le plastique, serait une matière idéale lors de la création d'objets nécessitant une grande résistance à des températures élevées. Le manque de gravité pose problème lors d'impression dans l'espace (Gaget, 2017).

Un projet est aujourd'hui en cours afin de permettre une impression en trois dimensions dans les stations spatiales sur base de métal. L'objectif, à terme, serait donc d'imprimer dans les stations spatiales des satellites d'un seul tenant, c'est-à-dire en une seule pièce, réduisant considérablement les coûts de mise en orbite (Gaget, 2017).

4. Risques et limites de l'impression tridimensionnelle

Malgré les avantages cités précédemment, toute technologie comporte des risques ou des limites et l'impression tridimensionnelle n'échappe pas à la règle.

Premièrement, lors du processus d'impression, le passage du filament par différents états entraîne une émission de particules fines. Ces particules peuvent atteindre les poumons et causer des problèmes respiratoires. Il est donc nécessaire d'équiper les imprimantes de filtres ou de systèmes d'aspiration. Contrairement aux imprimantes en trois dimensions industrielles qui sont équipées de filtres, les imprimantes à usage privé ne sont pas équipées de la sorte. Une bonne aération est donc recommandée (Beswic, 2017).

Deuxièmement, la question des droits d'auteur inquiète certains spécialistes. Mais comme expliqué plus tôt dans ce travail, les droits d'auteur ainsi que les droits des personnes qui impriment sont protégés si certaines conditions sont respectées. Il serait néanmoins judicieux d'éclairer ce point.

Troisièmement, comme dit précédemment, l'impression en trois dimensions est accessible à tout le monde car les fichiers en trois dimensions nécessaires sont facilement téléchargeables sur internet. C'est un point positif mais qui soulève un problème : tout le monde peut imprimer tout ce qu'il trouve. Ainsi, lorsque les plans d'impression d'une arme à feu sont mis en ligne, tout le monde peut se procurer une arme sans autorisation et sans aucun contrôle. Ceci représente un danger de l'impression tridimensionnelle.

Quatrièmement, si l'impression 3D est utilisée pour personnaliser des objets comme une voiture, le client peut déterminer chaque petite pièce présente dans son véhicule. Afin d'assurer une sécurité constante, il est nécessaire de vérifier que ces modifications n'impactent pas le bon fonctionnement du véhicule.

Cinquièmement, certains matériaux ne peuvent pas encore être imités. En effet, leurs propriétés ne sont pas toujours identiques (Interview de Monsieur Laurent Voets, 2018).

Sixièmement, utiliser une imprimante tridimensionnelle requiert l'utilisation d'un logiciel CAD ou d'un fichier digital utilisable directement. Lors de l'utilisation d'un logiciel, il est requis de maîtriser ce dernier afin d'assurer un produit fini de qualité (RTS Découverte, 2018). Ceci représente donc un investissement aussi bien en temps que financier (Voets, 2019).

Pour terminer, à chaque progrès technologique, la population s'inquiète pour l'emploi. Selon les citoyens, une technologie, comme la robotisation, peut prendre la place de l'homme car cette dernière est plus rapide, plus rentable et plus assidue qu'un humain. Mais, comme démontré dans certaines études, les nouvelles technologies amènent de nouvelles perspectives d'emploi. La croyance populaire peut néanmoins influencer l'utilisation d'une nouvelle technologie et diminuer le nombre de personnes intéressées. Le risque est que, si les experts prennent peur, ils ne s'y intéresseront pas et refuseront de collaborer avec les firmes d'impression tridimensionnelle (Liesse, 2018).

5. Améliorations futures

Les avantages cités précédemment sont des applications concrètes déjà utilisées à l'heure actuelle dans le monde. Certaines applications ne sont pas encore tout à fait abouties ou pourraient être optimisées. Ces améliorations futures sont analysées ci-dessous.

5.1. Secteur commercial

Des imprimantes 3D de plus petite taille permettraient d'imprimer des vêtements directement sur place, en voyage par exemple, et ainsi de limiter le poids des valises transportées. Un seul fichier serait donc nécessaire pour faire des emplettes (McMills, 2018).

5.2. Secteur agroalimentaire

Les impressions en trois dimensions actuelles ne sont pas complètes étant donné qu'une cuisson est nécessaire par la suite. L'objectif futur est donc de fournir un outil complet capable d'imprimer et de cuire un repas en entier. Ce but est en cours d'étude par le « Creative Machine Lab ». Leur souhait est d'utiliser des lasers pour mener à bien la cuisson des repas. Les deux types de lasers utilisés sont spécifiques et complémentaires mais un contrôle permanent de leur température est pour le moment obligatoire. Un laser à lumière bleue est utilisé dans le but d'amener une cuisson constante en comparaison avec la fonction de chaleur tournante d'un four traditionnel. Le laser infrarouge, quant à lui, sert de grill et va apporter des couleurs brunes aux aliments (Renard, 2019).

5.3. Secteur industriel

La personnalisation des voitures est aujourd'hui limitée à certains détails du tableau de bord mais nul doute qu'à l'avenir, elle prendra davantage le pas et portera sur davantage de pièces (Mechanical News & Products, 2019).

De plus, la production se fait actuellement par chaîne de production. Il serait intéressant de combiner la technique d'impression en trois dimensions avec un système de chaîne de production robotisée. Le robot pourrait être utilisé pour aller chercher et remplacer les produits finis dans plusieurs imprimantes 3D. La solution pourrait être entièrement automatisée (Voets, 2019).

5.4. Secteur de la construction

L'objectif, en matière de construction, serait de pouvoir utiliser les matières premières disponibles directement sur le lieu de construction, comme par exemple du sable du désert. Comme expliqué plus haut, une mission spatiale pourrait donc utiliser le sable qui se trouve sur la Lune pour créer des habitations. Ce projet est mené par l'agence ESA aux Pays-Bas (Arte, 2015).

Mi-avril 2019, le monde a été bouleversé par l'incendie qui a ravagé la Cathédrale Notre-Dame de Paris. Une société néerlandaise nommée « Concr3de » tente de convaincre l'Etat français d'utiliser l'impression en trois dimensions dans la reconstruction de Notre-Dame de Paris. La matière première serait un mélange de débris, de cendres trouvés sur place après la catastrophe et d'un liant. La technique employée serait donc l'impression par liage de poudre (Hermans, 2019).

Même si la question de l'authenticité persiste, dans ce cas-ci l'impression 3D apporte certains avantages. Le président français ayant imposé un délai de 5 ans pour finir la restauration de l'édifice, le recours à la fabrication additive permettrait de respecter la date d'échéance. Concr3de tente de mettre en avant de nombreux avantages comme le respect des plans originaux de la cathédrale ainsi que des études menées quant à la résistance des matériaux utilisés (Hermans, 2019). Afin d'appuyer ses propos, Concr3de a imprimé une réplique d'une des gargouilles de Notre-Dame dont le prix de construction, qui a pris 24 heures, varie entre 2.500 et 5.000 euros. Ceci représenterait un gain de 80 ou 90% en comparaison avec le prix nécessaire pour tailler des pierres (M.R., 2019).

Si le projet est avalisé, ce serait une première dans la reconstruction d'un bâtiment d'envergure (M.R., 2019). National Geographic avait procédé, quelques temps avant l'incendie, à un scan complet de l'édifice, ce qui pourrait permettre à Concr3de de concrétiser ce projet tout en respectant la minutie de la numérisation de la cathédrale (Voets, 2019).

5.5. Secteur militaire

L'armée américaine a pour projet de se servir davantage de l'impression 3D et de remplacer un grand nombre d'éléments endommagés des F-22 par des parties imprimées en 3D. En effet, cinq d'entre elles vont être testées dans les prochains mois. Ces dernières seront insérées dans l'avion lors de la maintenance de celui-ci, ce qui réduira le temps d'arrêt nécessaire pour le remettre à neuf de près de 60 jours (Svan, 2019). Lors d'exercices, l'emploi du plastique est favorisé mais le métal pourrait l'être davantage dans le futur (Egnash, 2018).

5.6. Secteur aérospatial

Premièrement, l'absence de gravité dans l'espace permet une conception différente que ce qui est réalisé sur Terre. Ainsi, la taille des satellites pourrait être revue à la baisse, réduisant nettement les coûts de lancement. Certains spécialistes estiment même qu'en équipant une imprimante de plusieurs têtes et en utilisant des jets d'air ou l'attraction électrostatique, il serait possible d'imprimer un objet de plusieurs cotés en même temps, c'est-à-dire qu'il ne devrait pas être posé sur une surface plane. Cela réduirait les dépenses et la durée de production nécessaire (Committee on Space-Based Additive Manufacturing & Aeronautics and Space Engineering Board, 2014). Par exemple, une imprimante pourrait, dès lors, créer la structure des satellites. Une université française étudie la possibilité d'utiliser la méthode par liage de poudre sans gravité. De plus, l'impression en trois dimensions utilisant le métal permettait un recyclage des métaux et donc une diminution des déchets (Gaget, 2017).

Deuxièmement, une imprimante 3D permettrait aux astronautes d'imprimer leurs repas directement dans l'espace (Touré, 2017).

6. Impression 3D au sein du secteur médical

Dans le secteur médical, l'impression en trois dimensions de tissus humains est appelée « bioprinting » ou bioimpression en français (RTBF, 2018). Initialement, les imprimantes utilisées étaient des imprimantes 3D classiques dont l'utilisation était dérivée. Puis, petit à petit, des imprimantes 3D spécifiques, appelées bioimprimantes ont fait leur apparition (Kalaskar, 2017).

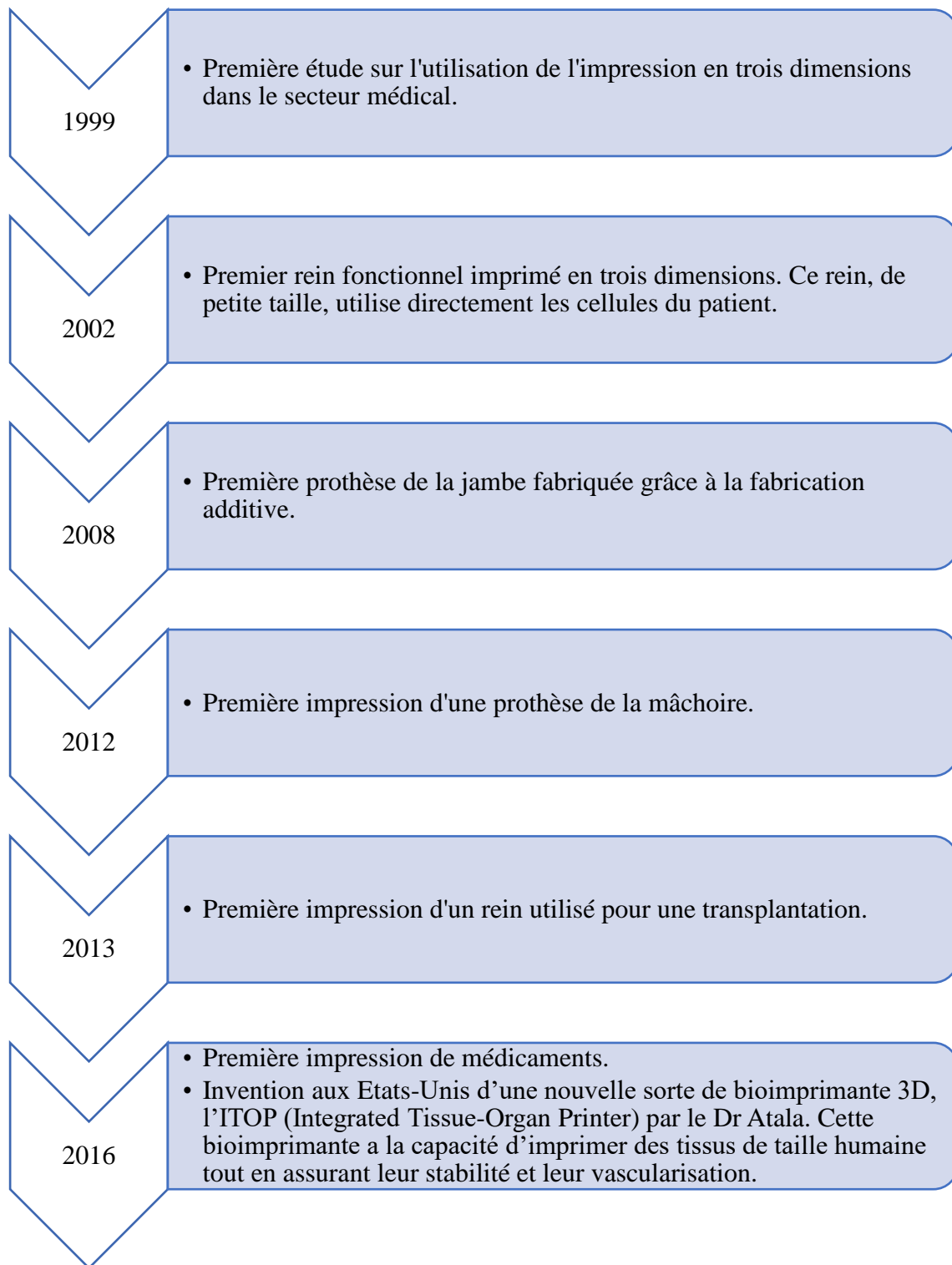
Une IRM peut être effectuée pour obtenir les mesures exactes de l'anatomie du patient. Celui-ci sert ensuite à créer le document en trois dimensions de la qualité nécessaire pour lancer une impression 3D. Le recours à la tomodensitométrie (une radio en coupe des organes) ou un scanner à faisceau conique est également réalisable. Ces techniques permettent d'avoir des données exactes quant à la structure des os ou des tissus humains. Les fichiers en deux dimensions obtenus sont ensuite analysés et rassemblés pour atteindre la troisième dimension grâce à un CAD. Le fichier digital final rassemble des informations quant à la constitution et les dimensions des organes du patient. La conversion de ce fichier en un fichier lisible par l'imprimante est la dernière étape avant l'impression de l'organe. Les matières utilisées dans ce cas sont diverses : la matière généralement utilisée pour les implants est le titane ou certains de ses alliages (Kalaskar, 2017).

Différentes techniques peuvent être mises en place pour une impression destinée au secteur médical : l'impression par dépôt de matière fondue, la stéréolithographie, le frittage sélectif par laser ou encore le PolyJet. Cette dernière utilise une encre biologique, à savoir de l'hydrogel rempli de cellules.⁴ La population de cellules se développe dans ce que nous appellerons la cartouche (Kalaskar, 2017).

6.1. Aperçu historique

La première étude concernant l'impression en trois dimensions dans le secteur médical date de 1999. Durant cette année, une pièce, peuplée de cellules d'un patient, a été imprimée en 3D et a ensuite été utilisée dans l'augmentation de la vessie de ce patient. Cette étude était une prouesse et a entraîné l'étude d'autres projets de fabrication additive. Ces projets sont résumés ci-après.

⁴ Voir Annexe n°3



5

Illustration n° 3: Résumé historique de l'impression 3D dans le secteur médical

⁵ Source :

Touré, A. (2017, Mai 22). *L'histoire de l'impression 3D: Les technologies d'impression 3D des années 80 à nos jours*.

Kalaskar, D. M. (2017). *3D Printing in Medicine*. London: Woodhead Publishing

6.2. Impacts

Pour rappel, l'impression permet d'obtenir un produit fini plus rapidement à un moindre coût, de réduire les déchets résiduels vu qu'il n'est plus nécessaire d'utiliser autant de matière que dans le cas de la fabrication soustractive. La probabilité d'erreurs est très basse puisque tout est optimisé, examiné par l'informatique et vérifié par l'homme si nécessaire. Un gain de poids se fait également ressentir.

Outre les impacts généraux, l'impression tridimensionnelle amène des impacts spécifiques au secteur médical, séparés en différentes branches. L'impression tridimensionnelle impacte le secteur médical : les implants, le remplacement d'organe ou encore la chirurgie mais également le pharmaceutique (Kalaskar, 2017).

Les impacts cités ci-dessous sont issus d'une revue de littérature. Par la suite, nous nous interrogerons afin de comprendre si ceux-ci sont déjà observables en Belgique.

6.2.1. *Impression d'implants et de prothèses*

Tout d'abord, les imprimantes 3D permettent de traiter certains problèmes de peau ou d'os. Certains exosquelettes sont imprimés, en un temps record, et améliorent la vie de patients, en maison de retraite, dont le système nerveux est déficient ou encore de patients quadriplégiques (Films Media Group & Österreichischer Rundfunk, 2013). Autre exemple, dans le Michigan, un état des Etats-Unis, un bébé de 18 mois, nommé Garrett, a pu être sauvé grâce à l'impression tridimensionnelle. Ses voies respiratoires dysfonctionnelles entraînaient des arrêts respiratoires quotidiens causés par la fermeture de sa trachée. Un implant permettant de la garder ouverte a été customisé, adapté à la forme de sa trachée et imprimé. Le corps de l'enfant devrait l'absorber en trois ans grâce à sa composition. Cette technique est encore rare puisque Garrett est seulement le deuxième enfant dans le monde à bénéficier d'un tel implant (American Institute of Physics. & Films Media Group, 2014). Enfin, comme expliqué précédemment, des personnes souffrant de malformations peuvent prétendre obtenir, grâce à l'impression en trois dimensions, une prothèse adaptée à leur morphologie. Tel est le cas d'une jeune française qui a pu, avec l'aide de son voisin, bénéficier gratuitement, vu que le fichier digital était disponible sur internet, d'une prothèse du bras entièrement personnalisée.

Comme expliqué précédemment, les implants actuels peuvent être fabriqués grâce à l'impression en trois dimensions. Chaque impression est unique car la forme et la taille correspondent parfaitement au corps du patient (Léna, 2014). De plus, dans le cas d'un implant traditionnel, l'impression 3D d'os permet également de vérifier si la prothèse de la hanche prévue pour un patient est de taille adéquate (Pace, 2019). Outre un gain de temps, la fabrication additive permet de réaliser, en petites quantités, un greffon unique qui est nécessaire pour répondre aux besoins du patient. Les greffes exigent, à l'heure actuelle, de créer un moule, de couler la pièce manquante et d'apporter les traitements assurant le bon fonctionnement du greffon. Les outils nécessaires à ces tâches sont onéreux, impliquent une grande production de déchets et nécessitent une grande quantité d'énergie, ce qui induit un prix élevé pour le patient (Kalaskar, 2017). En Belgique, Mobelife, une entreprise installée à Leuven, propose l'impression de prothèses de hanche adaptées à la morphologie du patient, ainsi qu'une réplique de celle-ci, principalement utilisée pour la préparation de la chirurgie. Ce processus ôte l'obligation de prélever des morceaux d'os sur le patient (Léna, 2014).

Les matériaux utilisés dans le cas d'impression d'implants sont le titane et certains alliages de titane. Ce matériel permet d'assurer entre autres la résistance à la corrosion. Le titane ne possède pas une malléabilité très élevée (Kalaskar, 2017). Il n'est néanmoins pas la seule matière pouvant être utilisée dans la fabrication d'implants. En effet, comme ce fut le cas en 2013 aux États-Unis, un implant crânien destiné à remplacer trois quarts de la boîte crânienne d'un patient a été imprimé en plastique (Léna, 2014).

6.2.2. Chirurgie

Sans impression en trois dimensions, le chirurgien, en préparation d'une greffe, peut réaliser à l'aide d'un moule une sorte de copie de la partie endommagée. Mais il n'a pas la possibilité de connaître en détail l'environnement ainsi que les dimensions de la zone à opérer. Dès lors, l'impression additive permet d'améliorer la préparation d'interventions chirurgicales et l'étude des différentes tactiques à utiliser pour contrer les problèmes rencontrés. Le chirurgien peut ainsi gagner du temps lors d'une intervention car il a pu se préparer efficacement et connaît déjà l'environnement de travail avant même d'avoir fait la première incision. Il peut ainsi visualiser la localisation exacte des nerfs ou vaisseaux et connaît les dimensions de chaque organe ou os qu'il pourrait rencontrer (Kalaskar, 2017). La préparation représente un gain de temps d'opération, de récupération et accroît considérablement la précision, diminuant par la même occasion le risque de problèmes post-chirurgicaux. Ce point compense largement les

coûts d'acquisition et d'utilisation d'une telle technologie (Léna, 2014). De plus, la durée passée en salle d'opération sera réduite et entraînera une diminution des coûts (Vinck, et al., 2018).

En effet, en Afrique du Sud, un hôpital a organisé un laboratoire permettant aux médecins d'imprimer en trois dimensions des organes ou autres parties du corps des patients, dans le but d'améliorer la préparation de certaines interventions chirurgicales. Les organes d'un patient atteint d'une tumeur ont ainsi été répliqués pour que le chirurgien puisse se familiariser avec l'environnement avant de procéder à l'intervention (Pace, 2019). Aux Etats-Unis, l'opération à cœur ouvert d'un nouveau-né a pu se dérouler sans encombre et rapidement grâce à la préparation du chirurgien, effectuée sur une réplique exacte du cœur de l'enfant (Léna, 2014).

Lors d'interventions sur une tumeur osseuse, l'impression en trois dimensions permet une ablation précise et complète tout en diminuant le temps d'opération, la quantité de sang perdu, les risques de traumatisme des tissus et de handicap (Kalaskar, 2017).

De plus, les actuels et futurs médecins pourront se familiariser et s'entraîner avec ces nouvelles techniques (Léna, 2014). A Paris, Sapo Implant, un centre de formation en implantologie utilise des maquettes 3D très semblables à la structure réelle d'un os lors des formations (Mascret, 2013).

6.2.3. Impression d'organes

L'impression de tissus pouvant remplacer des tissus humains a fait l'objet d'études un peu partout dans le monde. La difficulté dans l'impression d'organes vitaux réside dans le fait que la circulation du sang et de l'oxygène doit être assurée de manière constante (Ikonicoff, 2016). L'impression de gouttelettes aux propriétés similaires aux tissus humains a été mise sur pieds par un professeur de l'Université d'Oxford, Hagan Bayley. En général, la matière première est basée sur des cellules humaines saines et, dans le cas des gouttelettes, sur un mélange d'eau et de lipides servant à nourrir les cellules (Gardier, 2013). Des études ont également été menées aux États-Unis : la première étude consiste en la possibilité d'imprimer des oreilles en se basant sur du cartilage. Cette oreille artificielle viserait à remplacer une oreille endommagée ou perdue dans un accident (Mennessier, 2013). La seconde fut réalisée en Caroline du Nord où ils sont parvenus à trouver une technique pour imprimer des cartilages d'oreille, des os crâniens ou des muscles sur base de cellules souches. Après quelques tests sur des animaux de laboratoire, la longévité de ces greffons a été prouvée comme atteignant quelques mois (Ikonicoff, 2016).

Pour finir, la dernière innovation de cette technologie était attendue depuis quelques années. Comme le clamaient certains articles aux alentours de 2010, le rêve était de pouvoir utiliser l'impression en trois dimensions pour fabriquer un cœur viable. Cette invention permettrait de diminuer les effets secondaires d'une greffe du cœur et d'améliorer la gestion des maladies cardio-vasculaires (AFP, 2019). La difficulté résidait dans la fabrication des vaisseaux sanguins présents au sein de cet organe. Mais cette année, en 2019, des chercheurs ont atteint ce but ! En avril, un cœur artificiel de très petite taille correspondant à la taille d'un cœur de lapin, imprimé en trois dimensions à partir de cellules prélevées sur un patient, a vu le jour. La compatibilité du cœur avec le receveur est donc assurée (Mascret, 2019). L'innovation réside dans ce détail puisque, jusqu'à présent, la matière première n'était jamais issue du receveur. Néanmoins, le chemin à parcourir reste long. Mais cette technologie promet une avancée considérable pour la médecine (AFP, 2019).

6.2.4. Pharmacie

Jusqu'à présent, les firmes pharmaceutiques produisent en masse les médicaments, c'est-à-dire une production en grande quantité d'un même produit. Cela signifie que la dose est identique pour chaque pilule quel que soit le patient. Cette technique permet de réduire le coût (Kalaskar, 2017). Contrairement à cette technique, la fabrication additive permet de personnaliser les médicaments de chaque patient, d'adapter la dose ingérée et même de rassembler tous les médicaments nécessaires en un seul comprimé (Malaty & Rostama, 2017).

6.3. Améliorations futures

L'objectif en matière médicale est de continuer à mener des études sur l'impression de tissus plus complexes tout en assurant leur approvisionnement en nutriments avec, pour objectif final, d'imprimer des organes vitaux comme un cœur (Films Media Group & Österreichischer Rundfunk, 2013).

La question du remboursement des prestations médicales semble encore floue. En effet, en 2018, le KCE avertissait les patients qu'ils pourraient être amenés à payer un montant plus élevé s'ils avaient recours à des implants issus de la fabrication additive. Si ces derniers sont plus onéreux que les implants ordinaires et qu'aucune preuve de la supériorité de cet implant n'est apportée, aucun remboursement ne serait possible et uniquement à charge du patient. Le KCE souhaite un remboursement égal quelle que soit l'origine de l'implant (Vinck, et al., 2018). Après de nombreuses recherches, il n'y a encore aucune autre information ou réponse disponible à ce sujet. Néanmoins, avec l'utilisation croissante de l'impression tridimensionnelle dans ce secteur, il serait nécessaire d'y répondre.

Section 2 : Partie pratique

Tout au long de la partie précédente, nous avons parcouru la littérature afin de découvrir les avantages que représente l'impression en trois dimensions dans différents secteurs. Le focus sera maintenant mis sur le secteur médical. Afin de mener cette étude à bien, des entretiens ont été réalisés avec des professionnels impliqués dans le secteur médical. Les entretiens avaient pour but de recueillir leurs impressions quant à cette technologie. Toutes les personnes interviewées exercent en Belgique. Cela permet de voir où se situe la Belgique par rapport à cette technologie. De plus, le panel de personnes interviewées réunit différents profils. Ceci permet de comprendre si les fonctions exercées ont un impact sur la perception quant à la fabrication additive.

Tout d'abord, nous passerons en revue le guide d'entretien ainsi que le but recherché. Ensuite, chaque interviewé sera présenté brièvement dans l'optique de comprendre le parcours professionnel de chacun et de pouvoir faire un lien entre leurs réponses et leurs vécus respectifs. Pour finir, une analyse de leurs réponses sera menée afin de déterminer quels sont, selon eux, les avantages de l'impression 3D et quels sont les projets déjà en cours dans certains hôpitaux ou cabinets médicaux en Belgique.

1. Méthodologie

Le guide d'entretien⁶ a pour vocation de donner une certaine ligne de conduite pour l'entretien. Néanmoins, il n'interdit pas les digressions et permet à la personne interviewée de laisser libre court à ses pensées quant au sujet principal, à savoir l'impression en trois dimensions.

La première partie de questions a pour but de briser la glace en discutant du parcours de l'interviewé pour dresser son portrait et son identité professionnelle.

La deuxième partie aborde la technologie en général. Ce sujet est abordé car on peut penser que, généralement, si la personne interviewée n'utilise que peu de technologie quelle qu'elle soit, elle sera moins encline à utiliser l'impression 3D. Cette partie permettra de comprendre davantage la position adoptée par l'interviewé lors des questions spécifiques sur l'impression tridimensionnelle.

⁶ Voir Annexe n°4

La troisième partie est une discussion autour du sujet principal. Elle sera structurée comme suit. Nous positionnerons la personne interviewée par rapport à cette technologie, c'est-à-dire savoir si celle-ci en a déjà entendu parler, si elle l'a déjà utilisée ou encore si le sujet a fait l'objet de discussions durant son parcours académique. Notons que plus l'interviewé est jeune, plus la possibilité d'avoir abordé le sujet en cours est grande. Nous continuerons en évaluant l'opinion du professionnel interviewé sur cette technologie. L'entretien aboutira enfin à des questions sur les avantages et les inconvénients que représente une telle technologie. S'ensuivront des questions sur les services disposant d'une telle technologie ou désireux d'en disposer. Pour clore, des questions au sujet des patients et de leur réaction quant au recours à la fabrication additive seront également posées.

Une liste des applications possibles à l'heure actuelle sera énumérée afin de faire réfléchir la personne interviewée sur les différentes applications possibles et voir si cela la conforte dans ses réponses actuelles.

Quant à l'analyse des propos recueillis, elle se basera sur les impacts découverts dans la section précédente. Le but sera de déterminer si ces impacts sont d'application en Belgique. Nous évaluerons donc les impacts cités par les différents professionnels interviewés et les comparerons avec ceux découverts au préalable. Ensuite, nous déterminerons les éventuelles différences entre les propos recueillis et les impacts de la section précédente.

2. Présentation des personnes interviewées

2.1. Docteur Steven Creve



Illustration n° 4: Docteur Steven Creve

Steven Creve est docteur en chimie. Sa carrière a ensuite évolué vers l'informatique. Il a été pendant neuf ans directeur informatique de l'hôpital d'Alost. Ensuite, vient une carrière en tant qu'indépendant. Il effectue régulièrement des missions dans des hôpitaux. Il fut directeur informatique pendant 2 ans et demi à l'hôpital de Vilvoorde et depuis septembre 2018, il travaille à la Clinique Saint-Jean à Bruxelles. Pour commencer, son rôle gravitait autour des projets infrastructures et il est devenu, par la suite, directeur informatique.

2.2. Monsieur Jacques Godart



Illustration n° 5: Jacques Godart

Monsieur Jacques Godart est directeur informatique au sein du Centre Hospitalier de Wallonie picarde (CHwapi) depuis 2011. Il fait également partie du Pilotage de la Cellule Objectif Amélioration continue du CHwapi (COACH) qui traite des aspects de planification, d'exécution de projets et de démarches d'amélioration continue et de qualité. Après des études d'ingénieur de gestion à la LSM, il suit un Master en management des Institutions de Santé et de Soins à l'ULB. Il est chargé de cours à l'UCL sur le site de Mons et de Charleroi. Avant 2011, il a travaillé, pendant trois ans pour une ASBL favorisant l'échange d'informations entre les hôpitaux, les entreprises pharmaceutiques et les fabricants de matériel disponible médical. Ensuite, pendant onze ans, il a travaillé pour « Roche », une société pharmaceutique, sur des aspects commerciaux ou de gestion de franchise sur l'oncologie.

2.3. Docteur Juliette Heimann



Illustration n° 6: Docteur Juliette Heimann

Le Docteur Juliette Heimann exerce à Casteau dans un cabinet médical en tant que médecin généraliste. Diplômée de l'ULB en médecine en 2016, elle suit ensuite une spécialisation en médecine générale pour laquelle elle obtiendra son diplôme en 2018. Elle est spécialisée en médecine préventive, en médecine curative et fait également du planning familial.

2.4. Monsieur Jose-Antonio Pineiro



Illustration n° 7: Jose-Antonio Pineiro

Monsieur Jose-Antonio Pineiro est IT manager au sein du groupe hospitalier Chirec à Auderghem, sur le site Delta. Il y travaille depuis 30 ans. Le groupe Chirec regroupe trois grands hôpitaux et possède 1200 lits. Sa fonction principale est la gestion des infrastructures informatiques.

Après des études en électronique, il suit un Master biomédical et enfin un Master en cours du soir en informatique.

2.5. Professeur Raphaël Olszewski



*Illustration n° 8:
Professeur Raphaël
Olszewski*

Le Professeur Raphaël Olszewski est médecin, dentiste et stomatologue du service de Stomatologie et Chirurgie maxillo-faciale aux Cliniques Universitaires Saint-Luc. Il est également chargé de cours à la faculté de médecine et médecine dentaire. Il possède un laboratoire dentaire dans lequel il développe depuis des années des imprimantes 3D pour les applications ciblant les interventions chirurgicales maxillo-faciales et dentaires.

2.6. Monsieur Corentin Taminiaux



*Illustration n° 9: Corentin
Taminiaux*

Monsieur Corentin Taminiaux est diplômé prothésiste dentaire à la suite de trois ans d'études à Namur. Son métier consiste en la création de prothèses en collaboration avec les dentistes, qui réalisent les empreintes. Les prothésistes fabriquent ensuite tout type de prothèse. Les matières peuvent être de la résine ou du métal.

2.7. Mademoiselle Manon Van der Vorst



*Illustration n° 10: Manon
Van der Vorst*

Mademoiselle Manon Van der Vorst est kinésithérapeute. Elle exerce aussi bien à domicile qu'à son cabinet ainsi qu'à l'hôpital Jolimont en centre ambulatoire. Elle a effectué des études de 4 ans à la Haute Ecole Parnasse-ISEI à Bruxelles où elle a obtenu son diplôme en 2018.

3. Analyse des résultats

Comme nous avons pu le constater, le produit imprimé en trois dimensions est obtenu plus rapidement et est moins coûteux. Cette solution est plus écologique que la fabrication soustractive car la quantité de matière nécessaire est moindre. Un gain de précision et de poids est également considérable.

L'impression en trois dimensions bénéficie déjà d'un large champ d'applications. Tout d'abord, elle permet de créer différents implants ou exosquelettes. Elle apporte aussi une meilleure préparation des chirurgies grâce à l'étude de répliques exactes des organes atteints. Ce qui représente un gain de temps et accroît d'autant plus la probabilité de réussite. De plus, des organes imprimés à l'identique permettent aux jeunes médecins ou aux étudiants de s'entraîner. Pour finir, une personnalisation des médicaments en une seule gélule est possible afin de diminuer le nombre de médicaments à prendre chaque jour.

Tous ces constats sont issus de la littérature mondiale. Qu'en est-il en Belgique ? Les hôpitaux et les acteurs de la médecine sont-ils prêts à utiliser cette technologie au quotidien ? Quels sont les avantages de l'impression 3D pour ces derniers ? L'analyse des entretiens effectués a pour but de répondre à ces questions.

Cette technologie est apparue dans les années 80 mais la première étude de bioimpression, c'est-à-dire l'impression en trois dimensions de tissus humains, s'est déroulée en 1999. Comme nous avons pu le constater durant les différents entretiens, ce n'est que récemment que certaines applications commencent à voir le jour en Belgique. Ainsi, seul le Professeur Olszewski déclare posséder une imprimante 3D. Monsieur Taminioux, un autre interviewé, nous a confié qu'il utilisait également l'impression en trois dimensions dans un des deux laboratoires de prothèses dentaires. Certains hôpitaux, comme le Chirec où travaille Monsieur Pineiro, ont pour projet d'y avoir recours, via sous-traitance, pour quelques tâches uniquement. L'hôpital de Jolimont, où exerce Mademoiselle Van der Vorst, a déjà eu recours à cette technologie dans le cas de chirurgie.

Une étude de la situation belge quant à l'utilisation de la technologie en générale sera réalisée. Le but recherché est de comprendre si l'impression tridimensionnelle sera utilisée de manière optimale ou pas. La réflexion se base sur le principe que si un médecin ou un hôpital en général n'a que très peu recours à la technologie, il aura recours à l'impression tridimensionnelle selon le même ratio.

3.1. La technologie au sein du secteur médical

Afin de situer l'utilisation de la technologie, il est important de comprendre ce qu'elle signifie pour les interviewés avec lesquels nous nous sommes entretenus. Toutes leurs réponses concordent : la technologie englobe tout ce qui est exécuté par un ordinateur ou par une machine. Cette explication nous a été donnée par Monsieur Pineiro. Par exemple, l'intelligence artificielle ou encore l'impression tridimensionnelle sont des technologies. En d'autres mots, comme l'a dit Monsieur Taminiaux, « *la technologie c'est l'avancée, le progrès* ».

Comme le dirait Monsieur Godart, « *La technologie est omniprésente au sein du secteur médical* ». Cela résume bien la situation et correspond aux réponses des six autres professionnels. Toujours selon Monsieur Godart, dans les hôpitaux, la technologie est un acteur de l'accueil et du soin des patients, en liaison avec les autres départements de l'hôpital. Sans informatique, la prise en charge n'est pas globale. Une prise en charge globale est une plus-value pour l'hôpital. La technologie permet, par exemple, de disposer de la bonne information au bon moment, de limiter les tâches répétitives sans valeur ajoutée, comme par exemple le réencodage, tout en fournissant un échange d'informations structurées au sein de l'hôpital et vers l'extérieur car l'hôpital n'est plus le seul acteur de la santé.

Enfin, Mademoiselle Van der Vorst et le Docteur Heimann considèrent la technologie comme un outil de travail indispensable au quotidien. Par exemple, leur agenda est entièrement digital.

A ce jour, de nombreux hôpitaux et médecins utilisent déjà des dossiers médicaux digitalisés. En effet, les 6 personnes concernées ont recours à des dossiers digitaux. Ces derniers regroupent tous les protocoles, toutes les consultations et les radiologies du patient. Parfois, pour un même patient, deux dossiers médicaux existent. Tel est le cas au Chirec. L'un est destiné aux infirmiers et l'autre aux médecins. Même si un passage entre les deux dossiers est possible, l'objectif est de les fusionner. De plus, certains hôpitaux offrent déjà la possibilité aux patients d'accéder à leur dossier via une plateforme internet. D'autres donneront cette possibilité dans les mois à venir. En effet, selon Monsieur Godart, cela est nécessaire car « *petit à petit, on part de l'idée que le patient est partenaire de la gestion de sa propre santé et donc dans une logique de transparence, on met en place les dispositifs qui vont permettre de donner accès au patient à son dossier.* » Selon le Docteur Creve, il est toutefois indispensable de nettoyer ces données qui peuvent contenir des informations néfastes sur le patient telles que son agressivité. Il est élémentaire d'assurer la sécurisation de cet accès vu la nature des données stockées.

La technologie d'imagerie en trois dimensions est déjà fort présente en milieu hospitalier. Il existe de la radiothérapie en trois dimensions avec une modélisation des volumes à éviter en fonction du traitement de la radiothérapie. Cela permet au laser de ne pas brûler d'autres éléments vitaux. Lors de chirurgie des yeux, un médecin opère avec une paire de lunettes en trois dimensions. Ou encore, lors de chirurgie au niveau de la vessie, un robot « DA Vinci » offrant des images en trois dimensions permet d'apporter une certaine profondeur ce qui représente un critère de succès important. Pour finir, la 3D permet aussi d'apporter une image avec des profondeurs aux spectateurs qui désirent suivre l'opération sur un écran. Actuellement, il est toutefois nécessaire de disposer de lunettes adaptées. Toutes ces utilisations sont d'application au Chirec.

Certains hôpitaux belges utilisent déjà des robots d'aide à l'opération ou encore des algorithmes d'aide au diagnostic, qui fonctionnent généralement de la manière suivante : des images sont envoyées à un sous-traitant, qui utilise un algorithme via de l'intelligence artificielle pour renvoyer un diagnostic. La sous-traitance est, pour le moment, indispensable car cela demande un grand espace de stockage et des machines puissantes. Cette pratique est appliquée au sein du Chirec.

Quant à l'impression tridimensionnelle, certains projets sont en cours de lancement ou en cours de validation. Certains directeurs informatiques, à savoir Monsieur Godart et Monsieur Pineiro, ont déjà demandé une imprimante en trois dimensions pour se familiariser avec cette technologie avant de proposer des projets. Dans ce cadre, ils ont eu l'occasion de voir certaines applications ou certains objets créés en trois dimensions. Concrètement, depuis plus au moins cinq ans, le CHwapi s'intéresse à l'impression tridimensionnelle. Quant aux cliniques universitaires Saint-Luc, le Professeur Olszewski étudie la possibilité d'utiliser cette technique depuis 2002.

3.2. Avantages de l'impression tridimensionnelle

À la suite des entretiens recueillis, certains avantages sont apparus. Il est donc maintenant possible de comparer ce qui a été mis en évidence lors de la recherche de littérature avec les utilisations actuellement possibles en Belgique.

En général, utiliser l'impression en trois dimensions apporte des produits finis de meilleure qualité et en un temps moins long. Preuve en est que l'impression d'une dent prend 20 minutes. Un résultat rapide alors que, selon Monsieur Taminiaux, « *à mains nues, le travail prend entre*

deux et quatre heures donc le gain de temps est considérable. » Monsieur Olszewski, quant à lui, confirme ce gain de temps. En effet, « *c'est là qu'on gagne une ou deux heures en temps en salle d'opération, ça c'est impayable !* ».

Les risques d'erreurs sont très bas si tout est bien contrôlé. En effet, c'est à la charge de l'humain de vérifier le tout. Si une erreur survient, elle est issue du fichier digital, étant donné que l'imprimante suit les instructions qui lui sont données.

De plus, les professionnels affirmaient que leur production était de meilleure qualité et très semblable à l'objet copié. En effet, Monsieur Taminiaux nous a dit « *le résultat ressemble le plus à une dent naturelle même si ça ne l'est pas* ». Il ajoute : « *C'est du travail qui frôle la perfection. C'est tellement précis* ». Le gain de temps et de qualité découvert dans la littérature est donc réel.

3.2.1. Impression d'attelles

Lors de la revue de littérature, nous avons vu que les imprimantes tridimensionnelles permettent de traiter certains problèmes de peau ou au niveau des os. Ainsi, l'impression d'exosquelettes ou greffons est possible. Cet avantage se ressent également en Belgique. En effet, au Chirec, un des hôpitaux de l'étude, un projet sur la fabrication d'attelles est en cours de validation. Le déroulement de ce processus est le suivant : avec une tablette, des photos sous différents angles du poignet ou du membre endommagé sont prises. Ces photos sont ensuite envoyées à un sous-traitant qui prépare et imprime l'attelle. Les attelles sont donc uniques et au plus près de la morphologie du patient. Elles sont utilisées dans le cas de blessures aux genoux, à la cheville ou encore aux mains. Les avantages principaux d'une telle attelle sont que cette dernière est, comme dit précédemment, parfaitement adaptée au patient et que le poids est nettement réduit par rapport à une attelle ordinaire. Comme résumé par Monsieur Pineiro, « *on peut aller au plus près de la forme du doigt, de la main ou du bras et s'ajuster au plus juste par rapport aux images transmises pour créer l'élément 3D* ». Le projet est actuellement d'utiliser de la sous-traitance pour effectuer cette tâche. Mais lorsque le projet sera lancé, en septembre 2020, l'acquisition d'une imprimante 3D au sein même de l'hôpital sera étudiée. En effet, un gain de temps et d'argent pourrait être observé.

3.2.2. Remplacement de pièces endommagées

Ensuite, comme discuté dans les avantages du secteur commercial, l'impression en trois dimensions permet de remplacer des pièces défectueuses. Cet avantage ne s'applique pas uniquement au secteur médical. Néanmoins, certains services techniques dans les hôpitaux concernés, notamment le service technique du CHwapi, ont recours à l'impression 3D pour imprimer des pièces de rechange servant à remplacer des éléments défectueux. Ces pièces sont imprimées en trois dimensions car elles ne sont plus commercialisées. Cela peut être, par exemple, l'impression d'une pièce permettant de s'assurer qu'une porte est bien fermée. Ces pièces en plastique ou en métal sont, pour le moment, fabriquées par sous-traitance.

Par ailleurs, certains hôpitaux se sont interrogés sur la possibilité d'imprimer certaines pièces mécaniques en trois dimensions. Au CHwapi, ce serait principalement les biotechniciens qui en bénéficieraient. Ce service se charge de la maintenance et de petites réparations sur le matériel servant à faire des examens médico-techniques. Par exemple, certaines vis ou certains écrous abîmés pourraient être remplacés rapidement. Le problème est, actuellement, que les matériaux médicaux doivent être garantis. Cette garantie est attribuée par le marquage CE. Tout matériel biomédical est marqué CE, ce qui assure un certain niveau de qualité. Or, une imprimante 3D ne garantit pas une impression respectant les normes nécessaires à ce marquage. La responsabilité du fabricant sur l'ensemble du matériel est donc retirée. Un flou juridique subsiste encore aujourd'hui, freinant les applications biomédicales.

3.2.3. Dentisterie et stomatologie

L'impression tridimensionnelle a également des impacts dans le secteur de la dentisterie. Certaines prothèses peuvent être imprimées en trois dimensions. La morphologie de la dent ainsi que sa couleur sont obtenues grâce à un scan de l'empreinte de la dent, réalisé par le dentiste. Le logiciel permet de visualiser tous les petits détails pour obtenir un résultat optimal. Dans un premier temps, l'impression est réalisée sur base d'un bloc de cire afin de fournir rapidement un prototype au dentiste. Il s'en sert pour vérifier que l'impression sera adaptée au patient. Dans un second temps, de la céramique ou de la zircone sont utilisées pour imprimer, en 20 minutes, la dent définitive. Ces matériaux apportent un résultat sensiblement identique à une dent naturelle et de bonne qualité. Des laboratoires belges utilisent déjà cette technique. Les laboratoires plus grands, disposant du rendement nécessaire, possèdent leur propre

imprimante tandis que les autres laboratoires doivent utiliser de la sous-traitance ou collaborer avec d'autres laboratoires pour réaliser leurs impressions.

3.2.4. Chirurgie

Dans le cas de chirurgie, selon le Docteur Heimann, « *l'impression en trois dimensions permet de modéliser ce qui n'est pas directement visible à l'œil nu. Cela s'avère très utile.* »

Ensuite, comme constaté ci-dessus, l'impression en trois dimensions assure une préparation efficace de la chirurgie et permet une réduction du temps nécessaire pour mener à bien l'intervention. L'équipe chirurgicale peut obtenir une réplique exacte de la partie endommagée et tester différents scénarios à l'aide de plusieurs répliques identiques et ainsi voir quelle approche est la plus efficace et adaptée. A titre d'exemple, le Professeur Olszewski est à la base de l'impression en trois dimensions aux Cliniques Universitaires Saint-Luc. « *Il y en a qui me demandent plusieurs modèles de la même chose parce qu'ils ont coupé le premier comme ça et veulent essayer d'autres découpages sur un deuxième.* »

Le Professeur Olszewski nous explique également que, dans le domaine de la chirurgie maxillo-faciale et de la stomatologie, les médecins ont recours à des impressions stériles. L'impression est également utilisée pour du prototypage. Prenons pour exemple une mâchoire atteinte d'une tumeur qui, après ablation de la tumeur, nécessite des réparations. Elles sont effectuées par la fixation d'une prothèse sur l'os en utilisant une plaque métallique. Grâce à l'impression 3D et une réplique de la mâchoire du patient imprimée en une heure et demi, cette plaque peut être pliée au préalable et adaptée à la morphologie du patient avant même d'avoir fait la première incision. L'opération dure donc d'une heure à deux heures de moins car le patient ne doit pas attendre que cette plaque soit pliée et adaptée lors de l'intervention (Garteiser, 2015). La précision est également supérieure.

En neurochirurgie, pour les cranioplasties, le cerveau du patient est trépané, donc un trou est formé dans la calotte crânienne. Tout comme pour les chirurgies maxillo-faciales, les dommages sont réparés à l'aide de plaques en métal. Celles-ci vont être pliées avant l'opération grâce à des modèles 3D.

L'hôpital belge dans lequel exerce Mademoiselle Van der Vorst, a déjà eu recours à l'impression en trois dimensions dans le cadre d'une opération neurochirurgicale. Cette opération faisait suite au diagnostic d'une tumeur au cerveau. Le crâne était endommagé

puisque'il avait dû être entièrement ouvert. Il a pu être réparé à l'aide d'un morceau de crâne fabriqué grâce à l'impression en trois dimensions. Ce morceau avait été imprimé par un sous-traitant.

Un autre avantage est d'application aux Cliniques Universitaires Saint-Luc. Une prothèse peut déjà être implantée dans le corps d'un patient. Il s'agit de la prothèse de l'articulation temporo-mandibulaire. Cette prothèse est imprimée à partir de plastique et de métal.

3.3. Barrières à l'utilisation de l'impression tridimensionnelle

Le monde médical se doit de devenir de plus en plus numérique et doit suivre l'évolution technologique. Néanmoins, l'éthique du monde médical est très présente. C'est ce que nous a confirmé Monsieur Pineiro en affirmant « *C'est aussi le monde hospitalier qui est le plus éthique.* » Avant l'acceptation et l'utilisation d'une technologie comme l'impression en trois dimensions, une série de tests cliniques et d'études doivent être réalisés. Ils sont nombreux et nécessitent un panel de cobayes acceptant de s'y soumettre. Ce qui peut ne pas toujours être évident. Les tests sont encore plus poussés dans les cas d'implantation d'organes dans un corps humain, de greffes tissulaires ou de pose de prothèses imprimées en trois dimensions. Ainsi, le Professeur Olszewski, un des professionnels interviewés, a avoué avoir pu valider un seul modèle d'imprimante parmi plus de mille modèles disponibles.

De plus, beaucoup d'autorisations sont à obtenir auprès des autorités compétentes. Les matériaux utilisés doivent eux aussi correspondre à certains critères comme, entre autres, leur composition et leur hygiène. Plusieurs intervenants ont décrit ceci comme étant une barrière mais aussi une nécessité.

Enfin, utiliser une imprimante tridimensionnelle nécessite de trouver un fournisseur fiable et parfois, de passer par une longue étape qu'est l'appel d'offres. Un appel d'offres est généralement aussi nécessaire dans le cas d'acquisition d'une imprimante 3D.

De plus, si l'impression en trois dimensions de médicaments semble intéressante, l'industrie pharmaceutique peut refuser de donner la liberté d'imprimer des médicaments. En effet, si l'industrie pharmaceutique refuse de fournir les principes actifs en bulk plutôt qu'en dose finale, une telle pratique ne sera pas possible. Ensuite, les formats des médicaments peuvent différer. Par exemple, certains médicaments se prennent sous forme de sirop tandis que d'autres sont

sous forme d'injection. Cela peut donc être plus compliqué de regrouper tous les médicaments en un seul et unique produit. C'est ce qui a été mis en évidence par Monsieur Godart.

La méthodologie nécessaire pour imprimer un produit de qualité est également une barrière à l'utilisation de l'impression en trois dimensions. En effet, selon le Professeur Olszewski, beaucoup de personnes pensent que les différentes étapes à accomplir avant d'arriver au produit fini sont fastidieuses et nécessitent des connaissances très développées. *« Au contraire, si on apprend et puisque les imprimantes sont de plus en plus modernes, elles sont de plus en plus faciles à utiliser. »* Le recours à de la sous-traitance est donc envisagé.

Pour finir, le prix est également une barrière à l'utilisation de cette technologie. En effet, les producteurs doivent assurer une rentabilité ce qui nécessite d'afficher un prix relativement élevé. Pour exemple, le Docteur Creve a avoué que, actuellement, son lieu de travail ne disposait pas du budget nécessaire pour acquérir une telle machine. Néanmoins, il existe des machines low-costs. Elles permettent d'obtenir des modèles à un coût nettement moins élevé. Le Professeur Olszewski nous a donné un ordre de prix. Ainsi, une imprimante low-cost permet l'impression de modèle pour 20 euros en comparaison avec les 200 euros nécessaires avec des machines non low-costs.

3.4. Risques de l'impression tridimensionnelle

L'impression en trois dimensions dans le secteur médical ne représente pas que des avantages. L'impression de tous les médicaments d'un patient en une seule gélule semble être bien acceptée car elle permettrait de faciliter la vie des infirmiers et des patients. Mais les interactions entre les médicaments peuvent avoir de graves conséquences et leur efficacité peut en être diminuée. Il est donc impératif d'utiliser les nombreux moyens disponibles pour pouvoir déterminer, avant d'assembler les molécules, leur capacité à pouvoir coexister. Cela pourra causer une diminution de l'efficacité du principe actif ou même causer des dommages aux patients. En effet, le Docteur Heimann nous a confié : *« Certains médicaments ne peuvent pas être pris en même temps que d'autres. Par exemple, je pense aux hormones thyroïdiennes, on ne peut pas les prendre en même temps que les inhibiteurs de la pompe à protons pour tout ce qui est reflux etc. Donc si on les met ensemble dans une seule gélule, ce ne sera plus aussi efficace. »*

Comme toute nouvelle technologie, l'impression en trois dimensions menace de remplacer le travail de l'homme. Peu d'interviewés ont parlé du remplacement de l'homme lorsqu'ils ont exprimé leur point de vue. Néanmoins, ce point n'est pas négligeable. Le travail réalisé est de meilleure qualité et le temps de production est diminué. Ceci représente un gain de coût également. Une machine est beaucoup plus rentable qu'un homme mais pendant que la machine travaille l'homme peut s'appliquer plus longtemps sur d'autres projets. Et, il y aura toujours besoin de l'intervention de l'homme ne serait-ce pour vérifier la qualité du travail fini.

Pour finir, utiliser des techniques innovantes et réaliser des grandes avancées apportent une certaine notoriété aux médecins qui réalisent ces exploits. Cette notoriété ne doit néanmoins pas pousser les médecins à sauter des étapes. Prenons pour exemple, comme nous l'a confié le Professeur Olszewski, l'implantation d'une mâchoire entièrement imprimée en trois dimensions qui fut relayée dans de nombreux journaux en tant qu'exploit. Mais, malheureusement, le corps du patient rejeta cette pièce maxillaire peu de temps après. « *En réalité, ce n'était pas biocompatible. Les tissus mous tout autour de ce matériau se sont usés et puis, c'est horrible à dire, mais la mâchoire en métal est sortie au travers de la peau du patient.* » Cela confirme le besoin de mener à bien de nombreux tests et essais cliniques.

3.5. Perception quant à l'utilisation de l'impression en trois dimensions

Au niveau du monde médical, contrairement à ce que l'on pourrait croire, la perception ne diffère pas en fonction des générations. Les médecins doivent continuer à se mettre à jour, à suivre des formations et à s'intéresser aux innovations. Certains médecins avec une plus grande expérience n'ont plus rien à prouver et sont, plus que d'autres, ouverts à ce genre de nouvelles technologies. En effet, le projet d'attelles énoncé ci-dessus fut initié par un médecin avec un nombre d'années d'expérience élevé. Autre exemple, le projet de robotisation dans les salles d'opération fut lancé par des médecins avec de l'expérience qui, en général, sont plus sûrs de leurs gestes. Tandis que la plupart des personnes interrogées travaillant en hôpital ont la même opinion, l'avis des autres diverge. Le Docteur Heimann et le Docteur Creve n'ont pas la même opinion. Pour ce dernier, « *c'est très clair que [...] dans le secteur informatique la différence entre les générations devient de plus en plus difficile.* » Quant aux médecins généralistes, les applications dans leur domaine sont encore floues, ils ne perçoivent donc pas d'avantages dans son utilisation.

Au niveau des patients, les tests cliniques permettront de donner leurs avis mais généralement les patients ont tendance à être plus favorables. Ils obtiendront, par exemple, une attelle plus ajustée à leur besoin et à leur morphologie en comparaison avec un produit générique. Dans le cas d'impression tridimensionnelle utilisée pour du prototypage, ils pourraient même ramener leur modèle à leur domicile. Ceci apporte un côté ludique. Certains patients ont même déjà demandé à deux des professionnels s'il était possible d'utiliser l'impression 3D pour imprimer leur rotule endommagée et la remplacer.

3.6. Futur de l'impression tridimensionnelle

Toutes les personnes interrogées affirment que l'impression en trois dimensions est la technologie qui sera en vogue dans les prochaines années. De nombreux hôpitaux, dont ceux concernés par l'étude, vont donc de plus en plus y accorder une importance croissante dans les années à venir. De plus, beaucoup d'hôpitaux sont encore au stade de l'analyse sur les possibilités d'utiliser l'impression tridimensionnelle pour d'autres domaines. Cette étude porte notamment sur l'utilisation de celle-ci pour des chirurgies de la main ou pour l'impression de prothèses.

Actuellement, la technologie est encore relativement onéreuse mais elle commence à se démocratiser. La diminution du prix de cette technologie impliquera une augmentation de l'utilisation de celle-ci.

Pour le moment, la plupart des hôpitaux ont recours à des prestataires externes qui réalisent les impressions en trois dimensions dont ils ont besoin. Mais beaucoup affirment leur intention d'acquérir une imprimante 3D dans les prochains mois ou dans le courant de l'année prochaine au plus tard. Ce sont généralement les services informatiques qui vont s'en procurer une afin de faire découvrir aux autres services cette nouvelle technologie. De cette manière, chaque service pourra se familiariser avec les différentes possibilités qu'offre l'imprimante en trois dimensions. Généralement, en ayant une imprimante tridimensionnelle à disposition, les cas d'usage se développent. « *L'organe crée la fonction* » comme dirait Monsieur Godart. Une phase d'exploration est donc en cours avant d'arriver à des idées d'utilisation pertinentes. Le service informatique veut amener les différents corps médicaux à s'interroger sur les avantages que cette technologie pourrait leur apporter.

Certains imaginent la possibilité d'imprimer des médicaments traceurs. Ainsi Monsieur Godart voit cela comme « *la conjonction entre la 3D et l'IoT* ». Le traceur émettrait des informations au fil de son transit dans l'organisme.

La commercialisation de médicaments pourra, dans le futur, être tout à fait customisée et même adaptée aux génomes de chaque patient. Le Docteur Creve affirme : « *Dans le futur, c'est bien possible qu'on construise un médicament entièrement personnalisé et étudié sur base des génomes du patient. Quand on pense imprimante 3D, on pense aussi à créer des médicaments. Dans le secteur médical et le personalized healthcare, je pense qu'il y a un potentiel.* »

Enfin, l'impression d'organes fait énormément parler d'elle. Néanmoins, nous avons pu constater qu'aucun des hôpitaux concernés n'avaient déjà recours à ces impressions. Tous se disent néanmoins convaincus par une telle pratique. Il est toutefois nécessaire d'effectuer de nombreux tests pour débiter et optimiser cette technique. Beaucoup espèrent pouvoir diminuer la taille des listes d'attente et même assurer une transplantation d'organe à tous les demandeurs grâce à l'impression de tissus viables. Ceci suppléerait les dons d'organes. Certaines personnes interrogées affirment néanmoins que cela nécessitera de nombreuses adaptations, voire même des formations car des autres connaissances sont indispensables pour comprendre l'impression de tissus humains.

Section 3 : Pistes et limites

Après l'analyse des interviews réalisées, il est toutefois nécessaire d'émettre des réserves et d'énoncer certaines limites.

Premièrement, les personnes interviewées représentent un échantillon de la population. Cela signifie qu'à partir d'une partie de la population, nous émettons des déductions qui, en théorie, représentent la population. Ces déductions peuvent, statistiquement, être proches ou non de la réalité.

Deuxièmement, comme énoncé précédemment, l'analyse ne se base que sur des professionnels exerçant en Belgique. Cela permet d'avoir une vision globale de la situation dans notre pays. Néanmoins, il serait intéressant de comparer cette dernière avec la situation dans d'autres pays. En effet, comme nous avons pu le constater dans notre analyse de la littérature, beaucoup de projets sont lancés et beaucoup d'études sont menées à travers le monde. Il semblerait que les Etats-Unis occupent un rôle primordial.

Troisièmement, les améliorations de cette technologie avancent très rapidement. Il est donc possible que, tout aussi rapidement, d'autres nouveaux avantages apparaissent. La revue de littérature représente donc une vue de la situation à un moment donné.

Quatrièmement, l'impression tridimensionnelle est encore à son balbutiement, tous les risques possibles de cette technologie n'ont donc pas encore fait leur apparition. Il serait donc intéressant dans quelques années de réétudier la question afin de pouvoir dresser une liste plus complète des avantages et des inconvénients.

Conclusion

A l'issue de ce travail, nous pouvons émettre quelques constats. Le but final était de savoir quels risques et opportunités offrent les imprimantes 3D dans le secteur médical.

L'impression tridimensionnelle est une technologie révolutionnaire qui apporte de nombreux avantages dans de nombreux domaines. Malgré ces avantages, toute technologie apporte également son lot de risques. Les possibilités de cette technologie sont immenses. Quoique pas encore à son apogée, le potentiel de l'impression en trois dimensions est déjà grand et les études menées à ce sujet sont de plus en plus nombreuses.

Commençons d'abord par les avantages. La fabrication additive apporte une solution customisée, meilleure marché et prête rapidement pour le patient. Cette solution est généralement moins lourde. En effet, le poids observé est réellement moindre puisque la quantité de matière nécessaire est optimisée. Cette technologie permet, par l'impression d'attelles ou d'implants uniques et adaptés parfaitement à la morphologie du patient, de traiter certains problèmes osseux. Dans le cas de prothèse dentaire, la fabrication additive apporte un gain de temps de près de 85%, un résultat optimal et très ressemblant à la dent d'origine.

La fabrication additive est encore rarement utilisée pour fabriquer des implants dont le but est de les greffer dans le corps humain. Malgré cela, un bébé a déjà bénéficié d'un implant destiné à garder sa trachée ouverte. Il est également possible d'implanter une prothèse mélangeant du plastique et du métal en guise de remplacement de l'articulation temporo-mandibulaire.

L'impression tridimensionnelle permet aussi aux chirurgiens et aux médecins de s'entraîner et de préparer au mieux une opération. Chaque médecin pourra étudier parfaitement l'environnement dans lequel il va devoir travailler. L'impression en trois dimensions sert donc de modélisation. De plus, l'intervention sur le patient s'en trouve simplifiée grâce à l'adaptation morphologique antérieure des implants qu'offre l'impression 3D. Ainsi, pendant des chirurgies maxillo-faciales ou neurologiques, les plaques utilisées en guise de réparation des déformations peuvent être pliées avant le début de l'intervention chirurgicale.

Le temps de chirurgie et la précision de celle-ci sont également améliorés. Puisque les chirurgiens peuvent se préparer efficacement et que tous les outils nécessaires sont directement adaptés au patient, le temps de l'opération peut parfois être écourté. Ce gain est considérable

aussi bien pour le chirurgien que pour le patient. L'intervention durant moins longtemps, la récupération le sera aussi.

Enfin, utiliser la fabrication additive permet d'adapter les médicaments de chaque patient et de les imprimer en une seule gélule. Mais il faut faire attention aux interactions.

L'impression d'organes offre des perspectives considérables grâce à la bioimpression. Des organes, tel un cœur, pourraient être remplacés sans devoir attendre un donneur compatible. Cependant, cette technologie n'en est encore qu'à ses débuts.

Passons maintenant aux risques de l'impression tridimensionnelle. Utiliser une imprimante 3D requiert de devoir faire appel à de la sous-traitance ou d'effectuer un achat considérable. Ceci représente donc un investissement de temps et d'argent.

Un risque éthique est également présent : avant l'acceptation et l'utilisation d'une technologie comme l'impression en trois dimensions, une série de tests cliniques et d'études doivent être réalisés auprès des patients.

Les normes médicales actuelles imposent le marquage CE. Or, le processus d'impression 3D n'est pas, à l'heure actuelle, marqué CE. La qualité du produit ne peut pas être couverte par les garanties du marquage officiel.

Enfin, imprimer tous les médicaments d'un patient en une seule gélule est une solution agréable pour les infirmiers mais également pour les patients. Néanmoins, deux problèmes subsistent : d'une part, il faut pouvoir convaincre l'industrie pharmaceutique de fournir les différents composants de chaque médicament. D'autre part, les types des médicaments et les interactions entre ceux-ci sont à considérer. L'efficacité des médicaments pourrait être diminuée ou, pire encore, les effets pourraient être néfastes pour le patient.

Le risque de perte d'emploi est également présent mais à relativiser : la machine peut travailler en collaboration avec l'être humain et ce dernier peut effectuer d'autres tâches pendant que la machine effectue la sienne.

En conclusion, certains risques sont à prendre en compte. Le nombre de risques est, aujourd'hui, faible étant donné que l'impression en 3D n'en est qu'à ses balbutiements. Il est donc probable de percevoir certains risques au fur et à mesure du développement de cette technologie qui ne cesse d'évoluer. Néanmoins, utiliser une imprimante tridimensionnelle au sein du secteur médical apporte de nombreux avantages de personnalisation, de gain de temps, de précision et de sécurité pour le patient et le monde médical.

Bibliographie

- AFP. (2019, Avril 15). Des scientifiques présentent un prototype de coeur très particulier. *La Libre*. En ligne <https://www.lalibre.be/actu/sciences-sante/des-scientifiques-presentent-un-prototype-de-coeur-tres-particulier-5cb468d8d8ad587477adffee>, consulté le 6 mai 2019
- American Institute of Physics., & Films Media Group (Réalisateurs). (2014). *3D Printing Saves Babies' Lives* [Film]. En ligne https://fod.infobase.com/p_ViewVideo.aspx?xtid=58110, consulté le 25 novembre 2018
- Arte (Réalisateur). (2014). *Futuremag: L'imprimante 3D pour tous* [Film]. En ligne <https://www.youtube.com/watch?v=AWzjTxuhImQ>, consulté le 27 janvier 2019
- Arte (Réalisateur). (2015). *Futuremag: Des maisons imprimées en 3D* [Film]. En ligne <https://www.youtube.com/watch?v=WM5AbYpJVX4&t=139>, consulté le 10 février 2019
- Arte (Réalisateur). (2016). *Futuremag: Le stylo 3D* [Film]. En ligne <https://www.youtube.com/watch?v=ksj54Zd87Ys>, consulté le 25 avril 2019
- Barbin, P. (2018, Août 10). Et si on fabriquait bientôt chez soi ses chaussures grâce à une imprimante. *Le Figaro*. En ligne <http://www.lefigaro.fr/conso/2015/10/08/20010-20151008ARTFIG00187-et-si-on-fabriquerait-bientot-chez-soi-ses-chaussure-grace-a-une-imprimante.php>, consulté le 6 mai 2019
- Beswic. (2017, Octobre 2). *L'impression en 3D: quels risques pour la santé?*. En ligne sur le site Web de BeSWIC: <https://www.beswic.be/fr/blog/limpression-en-3d-quels-risques-pour-la-sante>, consulté le 17 mai 2019
- Bolinger, J. (2019, Janvier 29). Iwakuni Marines use 3D printers to revolutionize maintenance for fighter jets. *Stars and Stripes*. En ligne <https://www.stripes.com/news/pacific/iwakuni-marines-use-3d-printers-to-revolutionize-maintenance-for-fighter-jets-1.566446>, consulté le 17 février 2019

- Burke, M. M. (2019, Février 8). Rise of the machine: Okinawa Marines expand 3D-printing capabilities. *Stars and Stripes*. En ligne <https://www.stripes.com/news/pacific/rise-of-the-machine-okinawa-marines-expand-3d-printing-capabilities-1.567814>, consulté le 16 février 2019
- Christian, J. (2019, Février 9). *This 3D printed electric motorcycle looks like something from "Tron"*. En ligne sur le site Web de Futurism: <https://futurism.com/the-byte/3d-printed-electric-motorcycle-tron>, Consulté le 10 février 2019
- Collins Dictionary. (s.d.). *Extrude*. En ligne <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/extrude>, consulté le 3 mars 2019
- Collins Dictionary. (s.d.). *Extruder*. En ligne <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/extruder>, consulté le 3 mars 2019
- Committee on Space-Based Additive Manufacturing , & Aeronautics and Space Engineering Board. (2014). *3D Printing in Space*. New York: National Academies Press.
- Egnash, M. (2018, Mai 9). Soldiers needed Humvee parts and rifle grips during an exercise – so they printed them. *Stars and Stripes*. En ligne <https://www.stripes.com/soldiers-needed-humvee-parts-and-rifle-grips-during-an-exercise-so-they-printed-them-1.526009>, consulté le 17 février 2019
- Encyclopædia Universalis. (2019). *Extrudeur*. En ligne <https://www.universalis.fr/dictionnaire/extrudeur/>, consulté le 3 mars 2019
- Evans, B. (2012). *Practical 3d printers*. New York: Apress.
- Films Media Group, & Österreichischer Rundfunk (Réalisateurs). (2013). *3D Printers* [Film]. En ligne https://fod.infobase.com/p_ViewVideo.aspx?xtid=94206, consulté le 25 novembre 2018
- FP. (2019, Mai 9). De opmars van 3D-printing: koekjes uit de printer. *Het Nieuwsblad*. En ligne https://www.nieuwsblad.be/cnt/dmf20190509_04387612, consulté le 9 mai 2019
- Gaget, L. (2017, Novembre 29). *3D printing in space: The next revolution?*. En ligne sur le site Web de Sculpteo <https://www.sculpteo.com/blog/2017/11/29/3d-printing-in-space-the-new-revolution/> , consulté le 24 février 2019

Gardier, S. (2013, Avril 8). Des tissus biologiques imprimés en 3D. *Le Figaro*. En ligne <http://sante.lefigaro.fr/actualite/2013/04/08/20198-tissus-biologiques-imprimés-3d> , consulté le 1 mai 2019

Garteiser, M. (2015, Octobre). Imprimer. *Saint-Luc Magazine*, 35. En ligne <https://www.saintluc.be/services/medicaux/stomatologie/slmag-imprimante-3d.pdf>, consulté le 18 mai 2019

Hermans, T. (2019, Avril 29). Notre-Dame: des Néerlandais proposent de restaurer la cathédrale avec des imprimantes 3D. *Le Figaro*. En ligne <http://www.lefigaro.fr/culture/notre-dame-des-neerlandais-proposent-de-restaurer-la-cathedrale-avec-des-imprimantes-3d-20190429>, consulté le 1 mai 2019

Hood-Daniel, P., & Floyd Kelly, J. (2011). *Printing in Plastic: Build Your Own 3D Printer*. New York: Apress.

Ikonoff, R. (2016, Février 20). La construction de tissus humains par imprimante 3D devient une réalité. *Sciences & Vie*. En ligne <https://www.science-et-vie.com/corps-et-sante/la-construction-de-tissus-humains-par-imprimante-3d-devient-une-realite-6574>, consulté le 5 mai 2019

Interview de Monsieur Laurent Voets: Les limites et les risques de l'impression 3D [Vidéo]. (2018). Belgique: La Première. En ligne https://www.rtbf.be/lapremiere/article/detail_les-limites-et-les-risques-de-l-impression-3d?id=9986235

J.-B.P. (2019, Mai 8). *Née sans avant-bras et sans main gauche, elle reçoit une prothèse personnalisée imprimée en 3D*. En ligne sur le site Web de France3 <https://france3-regions.francetvinfo.fr/normandie/eure/evreux/prothese-personnalisee-fabriquee-imprimante-3d-offerte-jeanne-7-ans-1666261.html>, consulté le 9 mai 2019

J.C. (2019, Février 7). Voici le plus long pont du monde en béton créé avec une imprimante 3D. *La Libre*. En ligne <https://www.lalibre.be/actu/international/voici-le-plus-long-pont-du-monde-en-beton-cree-avec-une-imprimante-3d-5c5c6186d8ad5878f0767c84>, consulté le 20 février 2019

Kalaskar, D. M. (2017). *3D Printing in Medicine*. London: Woodhead Publishing.

- Kurutz, S. (2018, Janvier 3). A Selfie for Your Shelf. *The New York Times*. En ligne <https://www.nytimes.com/2018/01/03/style/doob-action-figure.html>, consulté le 1 mai 2019
- Kwok, N. (2016, Septembre 9). 3D printed urban cabin by DUS architects sits along amsterdam's canalside. *Design Boom*. En ligne <https://www.designboom.com/architecture/dus-architects-3d-print-urban-cabin-amsterdam-09-09-2016/>, consulté le 7 mai 2019
- Lansard, M. (2018, Juillet 5). *Impression 3D rapide*. En ligne sur le site Web Aniwaa: <https://www.aniwaa.fr/impression-3d-rapide/>, consulté le 24 avril 2019
- Larousse. (s.d.). *Extrudeuse*. En ligne <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/extrudeuse/32516>, consulté le 3 mars 2019
- Larousse. (s.d.). *Filament*. En ligne <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/filament/33676?q=filament#33620>, consulté le 3 mars 2019
- Larousse. (s.d.). *Impression*. En ligne <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/impression/41996>, consulté le 24 février 2019
- Léna, P. (2014, Mai 9). L'impression 3D en médecine : la chirurgie d'abord. *Le Figaro*. En ligne <http://sante.lefigaro.fr/actualite/2014/05/09/22329-limpression-3d-medecine-chirurgie-dabord>, consulté le 7 avril 2019
- Liesse, D. (2018, Avril 16). L'automatisation ne détruira pas forcément l'emploi. *L'Echo*. En ligne <https://www.lecho.be/economie-politique/belgique/economie/l-automatisation-ne-detruira-pas-forcement-l-emploi/10002047.html>, consulté le 24 mai 2019
- M.R. (2019, Avril 29). Notre-Dame: une entreprise a trouvé une astuce surprenante pour la reconstruction qui pourrait mettre tout le monde d'accord... *La Libre*. En ligne <https://www.lalibre.be/actu/international/notre-dame-une-entreprise-a-trouve-une-astuce-surprenante-pour-la-reconstruction-qui-pourrait-mettre-tout-le-monde-d-accord-5cc708fdd8ad586a5ad5ec85>, consulté le 2 mai 2019

- Maguire, P. (s.d.). *INDUSTRIE 4.0 : ANTICIPER LE MONDE INDUSTRIEL DE DEMAIN*. En ligne sur le site Web de l'OPI Office de Promotion des Industries et des Technologies <https://www.opi.ch/industrie-40-anticiper-le-monde-industriel-de-demain>, consulté le 21 mai 2019
- Malaty, E., & Rostama, G. (2017, Février). *L'impression 3D et le droit de la propriété intellectuelle*. En ligne sur le site Web de l'OMPI https://www.wipo.int/wipo_magazine/fr/2017/01/article_0006.html, consulté le 7 mai 2019
- Mascret, D. (2013, Août 30). Des imprimantes 3D pour la chirurgie réparatrice. *Le Figaro*. En ligne <http://sante.lefigaro.fr/actualite/2013/08/30/21179-imprimantes-3d-pour-chirurgie-reparatrice>, consulté le 1 mai 2019
- Mascret, D. (2019, Avril 15). Des scientifiques ont fabriqué un mini-cœur avec une imprimante 3D. *Le Figaro*. En ligne <http://sante.lefigaro.fr/article/des-scientifiques-ont-fabriquer-un-mini-coeur-avec-une-imprimante-3d/>, consulté le 6 mai 2019
- McMills, A. E. (2018). *3D Printing Basics for Entertainment Design*. New York, United States: Routledge.
- Mechanical News & Products*. (2019, Novembre 20). En ligne sur le site Web Design Fax: <http://www.nelsonpub.com/cms/dfx/opens/article-view-dfx.php?nid=4&bid=844&et=mechanical&pn=01>, consulté le 25 janvier 2019
- Mennessier, M. (2013, Février 21). Des oreilles artificielles obtenues grâce à la 3D. *Le Figaro*. En ligne <http://sante.lefigaro.fr/actualite/2013/02/21/19902-oreilles-artificielles-obtenues-grace-3d?position=3&keyword=3D>, consulté le 5 mai 2019
- Mongeon, B. (2016). *3D Technology in Fine Art and Craft :Exploring 3D Printing, Scanning, Sculpting and Milling*. New York: Focal Press.
- Pace, A. (2019, Février 10). *3D printing helps doctors prep for surgery*. En ligne sur le site Web Capetown etc <https://www.capetownetc.com/news/3d-printing-helps-doctors-prep-for-surgery/>, consulté le 10 février 2019

- Pêcheux, F. (s.d.). *Impression 3D*. En ligne sur le site Encyclopædia Universalis <https://www.universalis.fr/encyclopedie/impression-3d/> , consulté le 10 mars 2019
- Renard, M. (2019, Février 4). *L'impression 3D alimentaire : une révolution en cuisine ?* En ligne sur le site Web 3Dnatives <https://www.3dnatives.com/impression-3d-alimentaire-04022019/>, consulté le 8 mai 2019
- RTBF. (2018, Août 2). *Impression 3D: révolution ou gadget à haut risque?*. En ligne https://www.rtbf.be/info/societe/detail_impression-3d-revolution-ou-gadget-a-haut-risque?id=9986456, consulté le 17 février 2019
- RTS Découverte. (2018, Février 19). *Les plus et les moins de l'impression 3d*. En ligne <https://www.rts.ch/decouverte/sciences-et-environnement/technologies/l-impression-3d/9346962-les-plus-et-les-moins-de-l-impression-3d.html>, consulté le 16 mai 2019
- Sculpteo. (s.d.). *Filament pour l'impression 3D*. En ligne <https://www.sculpteo.com/fr/glossaire/filament-definition-fr/>, consulté le 3 mars 2019
- Sculpteo. (s.d.). *Frittage Sélectif Laser (SLS) : Impression 3D sur Poudre*. En ligne <https://www.sculpteo.com/fr/glossaire/frittage-selectif-laser-sls-definition/>, consulté le 3 mars 2019
- Sculpteo. (s.d.). *Technologie d'impression 3D : Multi Jet Fusion*. En ligne <https://www.sculpteo.com/fr/materiaux/materiaux-jet-fusion/>, consulté le 23 mai 2019
- SPF Economie. (2018, Janvier 15). *Qu'est-ce que la propriété intellectuelle ?* En ligne sur le site Web du SPF Economie <https://economie.fgov.be/fr/themes/propriete-intellectuelle/innovation-et-propriete/quest-ce-que-la-propriete>, consulté le 15 mai 2019
- SPF Economie. (2018, Octobre 2). *Internet des objets*. En ligne sur le site Web du SPF Economie <https://economie.fgov.be/fr/themes/line/telecommunications/internet-des-objets>, consulté le 20 mai 2019
- Statista. (2019). *Most used 3D printing technologies in 2017 and 2018*. En ligne <https://www.statista.com/statistics/560304/worldwide-survey-3d-printing-top-technologies/>, consulté le 4 mai 2019

- Stratasys. (s.d.). *Multi Jet Fusion (MJF)*. En ligne <https://www.stratasysdirect.com/technologies/multi-jet-fusion#how-does-mjf-work>, consulté le 23 mai 2019
- Svan, J. H. (2019, Janvier 18). 3D printing may revolutionize maintenance for the stealthy F-22. *Stars and Stripes*. En ligne <https://www.stripes.com/news/3d-printing-may-revolutionize-maintenance-for-the-stealthy-f-22-1.565003>, consulté le 16 février 2019
- Techopedia. (s.d.). *Computer-Aided Design (CAD)*. En ligne <https://www.techopedia.com/definition/2063/computer-aided-design-cad>, consulté le 16 février 2019
- Touré, A. (2017, Mai 22). *L'histoire de l'impression 3D: Les technologies d'impression 3D des années 80 à nos jours*. En ligne sur le site Web de Sculpteo <https://www.sculpteo.com/blog/fr/2017/05/22/lhistoire-de-limpression-3d-les-technologies-dimpression-3d-des-annees-80-a-nos-jours/>, consulté le 25 avril 2019
- Vinck, I., Vijverman, A., Broeckx, N., Vollebregt, E., Wouters, K., Piët, M., ... Neyt, M. (2018, Janvier 16). *Les implants imprimés en 3D font des progrès rapides, mais sont-ils aussi sûrs et efficaces ?*. En ligne sur le site Web du KCE Centre fédéral d'expertise des soins de santé <https://kce.fgov.be/fr/les-implants-imprim%C3%A9s-en-3d-font-des-progr%C3%A8s-rapides-mais-sont-ils-aussi-s%C3%BBrs-et-efficaces>, consulté le 20 mai 2019
- Voets, L. (2019, Mai 16). *IN(3D)USTRIE, la 3D un atout pour votre entreprise*. Tournai: Wap's Hub ASBL.
- Walker, A. (2013, Juin 21). 3D PRINTING FOR DUMMIES: HOW DO 3D PRINTERS WORK? *The Independent*. En ligne <https://www.independent.co.uk/life-style/gadgets-and-tech/features/3d-printing-for-dummies-how-do-3d-printers-work-8668937.html>, consulté le 3 mai 2019
- Wayenberg, A. (Réalisateur). (2018). *L'industrie 4.0 expliquée en 90 secondes* [Film]. En ligne <https://www.agoria.be/fr/VIDEO-l-industrie-4-0-expliquee-en-90-secondes>, consulté le 21 mai 2019

Zart, N. (2019, Février 10). *A Wild & Futuristic Motorcycle That Is 3D Printed & Has Airless Tires — Welcome To The Future*. En ligne sur le site Web Clean Technica <https://cleantechnica.com/2019/02/10/a-wild-futuristic-motorcycle-that-is-3d-printed-has-airless-tires-welcome-to-the-future/> , consulté le 10 mars 2019

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Louvain School of Management

Chaussée de Binche 151, 7000 Mons, Belgique | www.uclouvain.be/lsm