

Risques émergents et perspectives d'évolution Nanotechnologies & Imprimantes 3D

Eric Bertrand - Ingénieur

Rencontres Nationales du GP'Sup

A Polytechnique Montréal du 23 au 25 mai 2023

Avec la collaboration du CIRANO

Introduction

La fabrication additive, communément appelée impression 3D, regroupe toutes les technologies permettant de fabriquer un objet à partir d'un modèle numérique, en ajoutant de la matière couche par couche.

Une imprimante 4D pour matériaux mous magnéto-actifs

Des chercheurs ont créé le logiciel et le matériel d'une imprimante 4D destinée à imprimer des matériaux mous multifonctionnels ayant des applications dans le domaine biomédical. Ce type d'impression est complexe car le matériau à extruder passe de l'état liquide à l'état solide pendant le processus d'impression. En plus de l'impression 3D, cette machine possède ainsi des fonctions supplémentaires. Elle peut programmer la réponse du matériau de manière à ce qu'il change de forme sous l'effet d'un champ magnétique externe ou que ses propriétés électriques se modifient sous l'effet d'une déformation mécanique. Cette nouvelle méthode d'impression ouvre la voie à la conception de robots mous ou de capteurs et de substrats intelligents qui transmettent des signaux à différents systèmes cellulaires.

Maria Luisa Lopez-Donaire et al., Computationally Guided DIW Technology to Enable Robust Printing of Inks with Evolving Rheological Properties, Advanced Materials Technologies, 2023. doi.org/10.1002/admt.202370012 Le déploiement de l'hydrogène pourrait augmenter le niveau de méthane atmosphérique si les fuites sont trop importantes.

Raymond Kurzweil, l'ex-ingénieur futuriste de Google, est transhumaniste et fondateur de l'Université de la Singularité, dont le concept central consiste à mesurer le point de Singularité, moment où l'intelligence humaine collective serait dépassée par **l'intelligence artificielle**. **Ses projections actuelles le mènent en 2045, année où notre compréhension et nos capacités dans les domaines de l'intelligence artificielle (IA), des systèmes autonomes, de la robotique, de la biotechnologie et des nanotechnologies devraient dépasser l'ensemble de l'intelligence humaine combinée.** Concordance des agendas ? Le 28 mars 2023, Ray Kurzweil annonçait que les humains atteindraient l'immortalité dans huit ans, que des nanorobots aideraient à garantir l'immortalité humaine car la génétique, les biotechnologies, les nanotechnologies et la robotique conduiraient à la mise au point de «nanorobots» anti-âge. Ces nanorobots répareraient les cellules et les tissus vieillissants et rempliraient les fonctions de la plupart des organes vitaux.

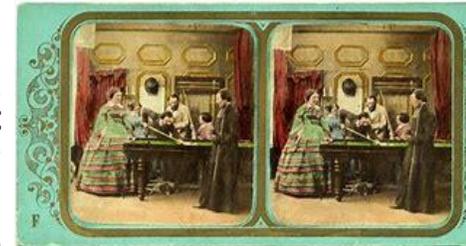


Définition

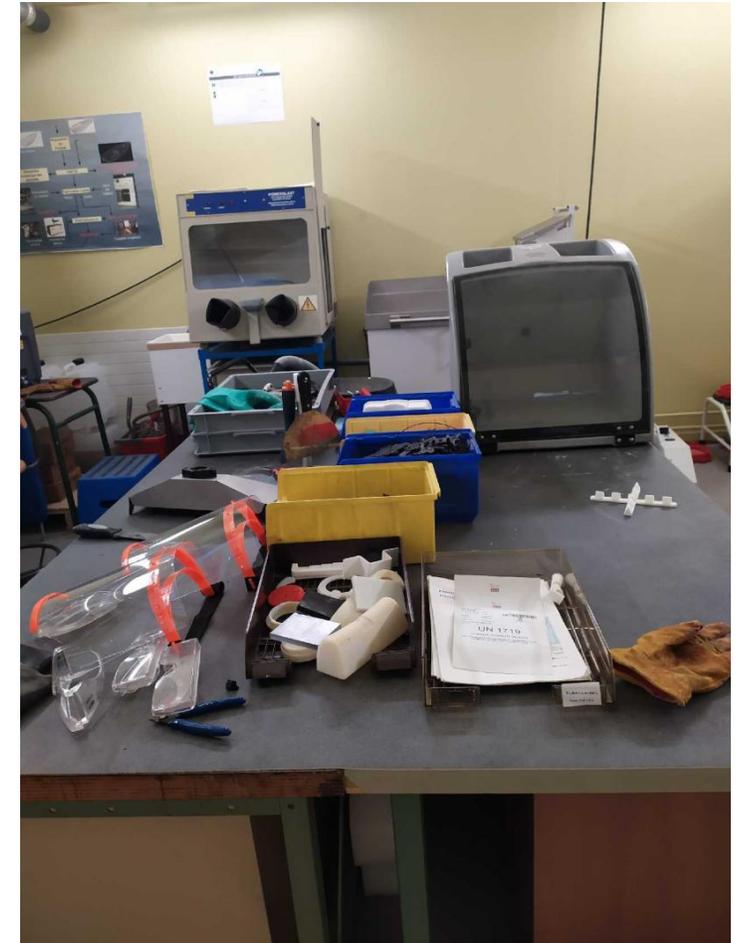
- Impression
 - Selon le dictionnaire Larousse (s.d.), l'impression consiste à transformer un fichier digital en une copie ou un objet tangible.
- Impression 3D
 - L'impression 3D est également appelée fabrication additive.
 - La fabrication additive peut être réalisée à partir de plastique, de résine 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 Les imprimantes 3D au sein des entreprises
 - Le terme « trois dimensions » signifie que la machine se base sur trois axes distincts pour fabriquer l'objet (Mongeon, 2016)
- 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).
- 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).
- 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).

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. 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 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.



Impression 3 D: des opportunités et des risques

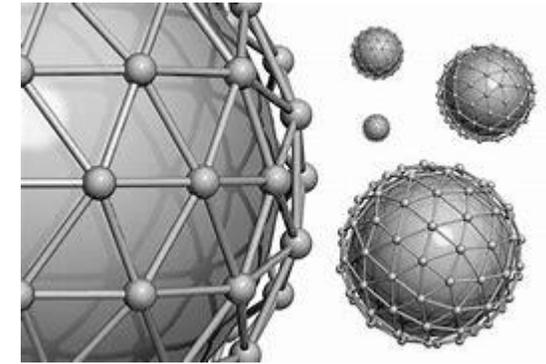


Impression 3 D: des opportunités et des risques



Nanoparticules

- **Les nanoparticules, également appelées particules ultrafines (PUF), sont des molécules dont la taille varie entre 1 et 100 nanomètres ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 0,000000001 \text{ m}$).** Elles sont donc **plus grandes que des atomes et plus petites qu'une cellule**. On distingue les nanoparticules « élaborées », fabriquées artificiellement, et les « émissions secondaires », sous-produits d'une réaction, comme les particules présentes dans la fumée de cigarette ou les émissions de diesel.
- Les nanoparticules artificielles sont fabriquées soit par fractionnement d'un matériau massif (approche descendante), soit par agglomération d'atomes (approche ascendante). Elles se présentent sous la forme de poudres, de gel ou de solutions. Leur intérêt réside dans leur taille qui leur confère des propriétés physico-chimiques inédites. Une même molécule peut d'ailleurs être inactive à l'échelle microscopique (10^{-6} m), et devenir très efficace à l'échelle nanoscopique.
- Il existe des nanoparticules de n'importe quel matériau : carbones, céramiques, métaux, etc. On ne peut donc pas parler de façon générique des nanoparticules : chacune a ses propres caractéristiques, notamment en ce qui concerne la toxicité et la pénétration. Elles sont aujourd'hui utilisées dans de nombreux domaines : électronique, cosmétique, automobile, chimie, textile, pharmacie, agroalimentaire, optique, etc.
- Les nanoparticules peuvent représenter un risque pour la santé à cause de leur petite taille. Les nanoparticules ont une taille qui les place entre la matière macroscopique et l'échelle moléculaire, elles sont dangereuses pour l'organisme, car elles sont plus petites que nos cellules. **Elles sont si petites qu'elles traversent notamment sans difficulté la barrière encéphalique chez les humains.**
- Leur impact n'est pas encore bien connu, car l'usage des nanomatériaux ne date que des années 1990. **L'évaluation des risques liés aux nanotechnologies a du retard.** Et si les experts sont unanimes sur la nécessité d'augmenter les recherches, l'ampleur de la tâche est titanesque. **Des centaines de nanomatériaux différents sont déjà sur le marché français. La recherche publique française consacre aujourd'hui moins de 5 % de son budget "nano" à cette question des risques. Plusieurs associations réclament une contribution financière des entreprises.**
- Les nanoparticules peuvent également avoir un impact négatif sur l'environnement, car à cause de leur taille, **elles ne sont pas filtrées dans l'eau ou dans l'air et se répandent directement dans la nature.**
- La législation en matière de nanoparticules n'est pas encore très précise. En France, depuis la loi Grenelle 2 de 2013, les fabricants, ainsi que les importateurs et les distributeurs doivent déclarer tous les ans les quantités et les usages des nanoparticules qu'ils manipulent auprès de l'ANSES (Agence Nationale de Sécurité Sanitaire).



Secteurs

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.

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.



Secteur agroalimentaire

Une autre société a développé une imprimante 3D pour réaliser des 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).



Secteur



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 indispensables 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).



Secteurs

Secteur de la construction

Les 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).



Secteur industriel

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).

Urbee



Secteur militaire

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).



Impression 3 D

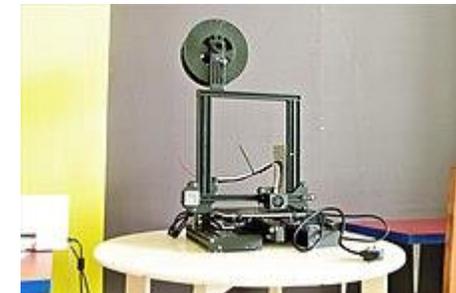


L'impression 3D ou fabrication additive regroupe les [procédés de fabrication](#) permettant de créer des pièces en volume par ajout de matière en couches successives. Elle s'oppose à la [fabrication soustractive](#). Cette famille de procédés a commencé à se développer au début des années 1980 avec pour objectif principal de faciliter le prototypage rapide, puisque le coût de production est pratiquement indépendant de la quantité produite.

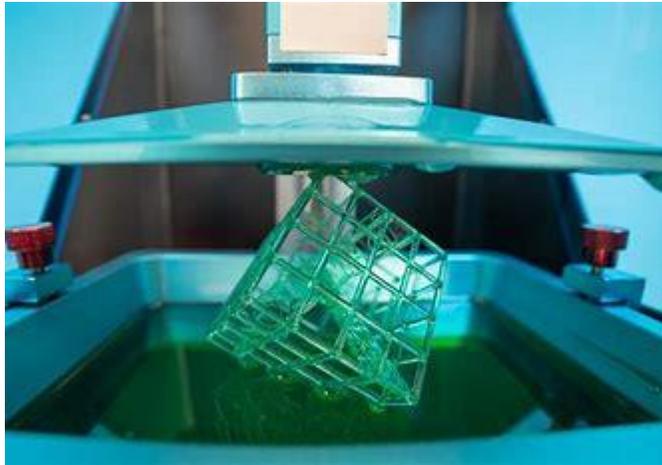
Les applications de l'impression 3D sont multiples. D'abord cantonnée au [prototypage](#) et aux visualisations pour l'architecture ou les études de design, elle se développe ensuite dans le domaine de l'appareillage et la prothèse. Les évolutions technologiques successives en ont fait une technologie plus mature qui est aujourd'hui utilisée dans des domaines aussi variés que l'[industrie](#), l'[aéronautique](#), la [construction](#), l'[armée](#), la [bioimpression](#) ou l'[alimentation](#).

Initialement réservée aux industriels du fait de son coût et sa difficulté de mise en place, l'impression 3D a connu une révolution dans les [années 2000](#) à la suite des développements amorcés par le projet [RepRap](#) et l'expiration du brevet sur la technologie FDM (Fused Deposition Modelling).

Aujourd'hui l'impression de nombreux matériaux est possible, selon le procédé utilisé. On peut notamment relever le [plastique](#) (généralement PLA ou ABS), la [cire](#), le [métal](#) (aluminium, acier, titane, platine), le [plâtre de Paris](#), les céramiques et même le verre

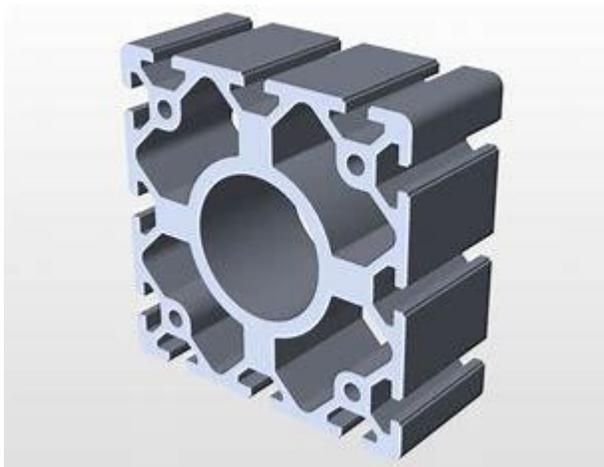


Technique d'impression



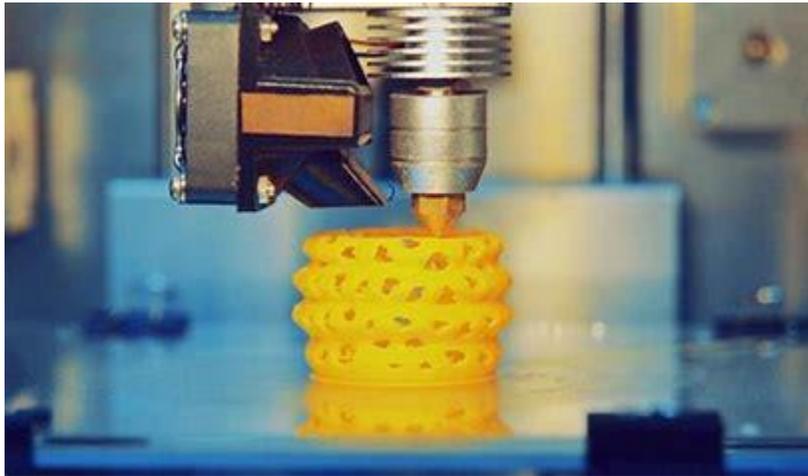
Technique	Descriptif
Photopolymérisation	La stéréolithographie (SLA) mise au point par l'américain Charles W. Hull (Kalaskar, 2017). Elle exploite une source de lumière pour renforcer une résine acrylique liquide qui peut être entièrement transparente (Films Media Group & Österreichischer Rundfunk, 2013). 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).

Technique d'impression



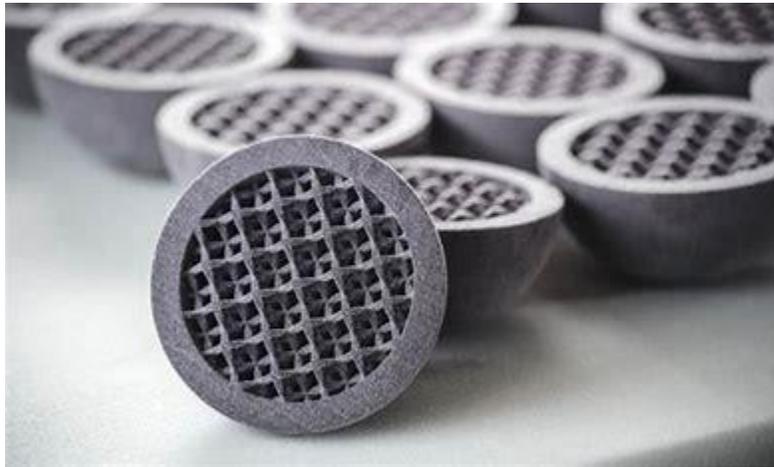
Technique	Descriptif
Extrusion	<p>L'impression par dépôt de matière fondue (FDM) ou « Fused Filament Fabrication » en anglais (Evans, 2012). Le plastique est chauffé et est déposé par la tête d'impression couche par couche (Films Media Group & Österreichischer Rundfunk, 2013). Les couches durcissent 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)</p>

Technique d'impression



Technique	Descriptif
Projection de matière	<p>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)</p>

Technique d'impression



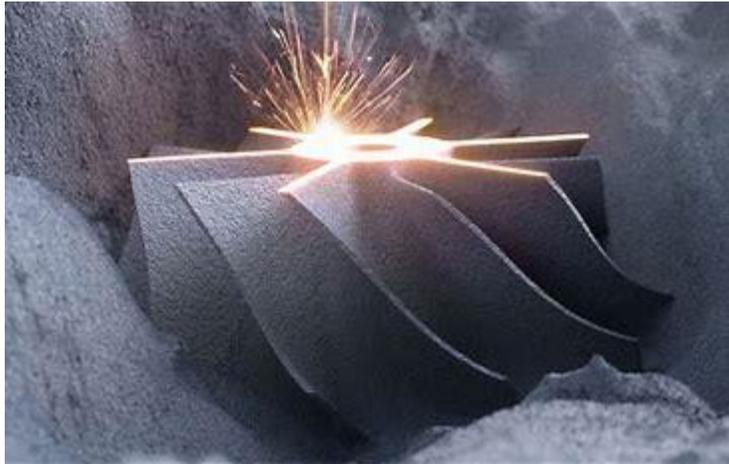
Technique	Descriptif
Projection de liant	<p>L'impression par liage de poudre, aussi appelée Binder Jetting (BJ) le processus se fait toujours couche par couche mais cette fois c'est une poudre qui est fixée par un liant tel que la colle (Arte, 2014). Un jet d'encre peut également être ajouté pour apporter 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).</p>

Technique d'impression



Technique	Descriptif
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).

Technique d'impression



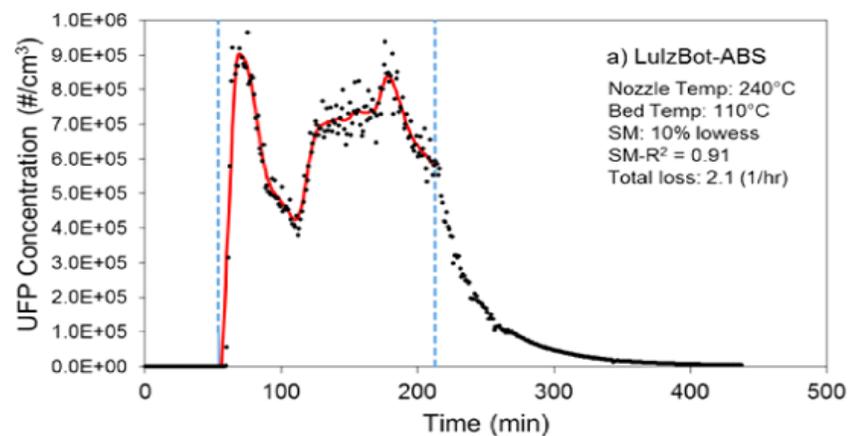
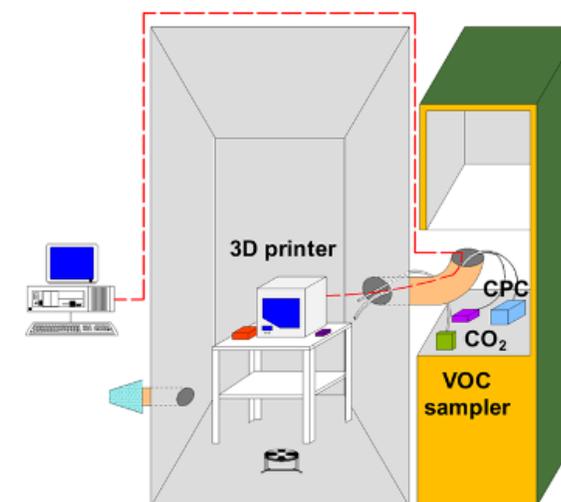
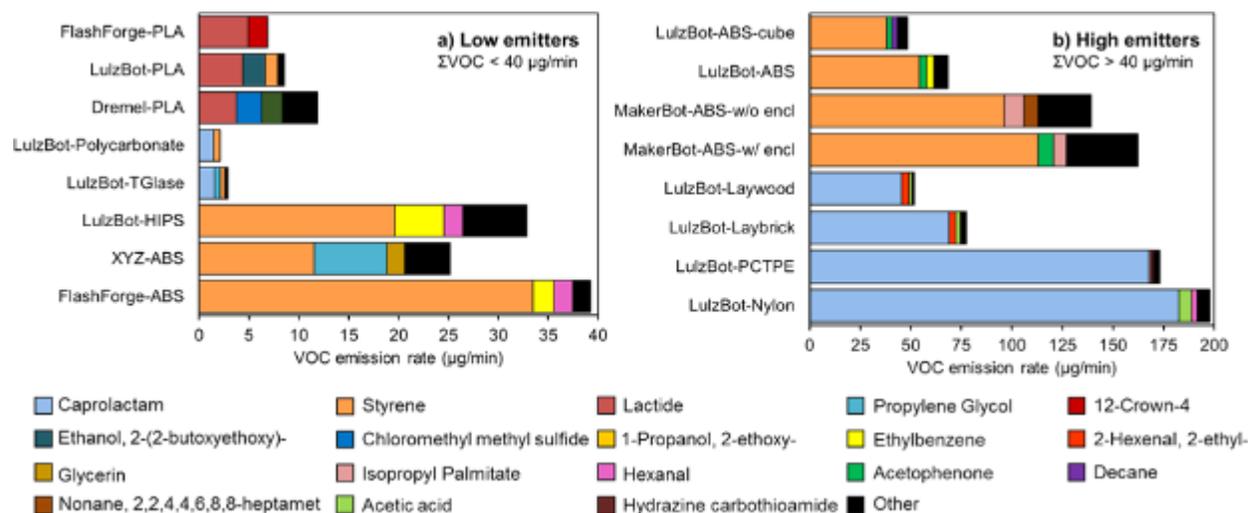
Technique	Descriptif
Fusion sur lit de poudre	<p>La technique du frittage sélectif par laser (SLS). L'inventeur de cette technologie est l'américain Carl R. Deckard. Le matériel utilisé dans cette technique est une poudre qui est fixée par un laser. Une épaisseur de poudre fine permet la création d'un 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.).</p>

Technique d'impression



Technique	Descriptif
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).

Etude sur les dangers liés aux imprimantes 3D



Matériaux les plus dangereux

- Les matériaux les plus dangereux pour l'impression 3D sont ceux qui contiennent des éléments chimiques toxiques tels que l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) qui est un polymère thermoplastique. En effet, le fil d'impression ABS contient de nombreux produits dangereux. D'autres matériaux tels que le Nylon, le PCTPE, le Laywood ou le Laywbrick peuvent également être potentiellement irritants et toxiques.
- Il est important de prendre en compte les risques chimiques liés aux imprimantes 3D et à leurs différentes technologies. Les émissions de particules fines, de composés organiques volatils et de gaz nocifs sont des risques chimiques courants. Il y a également des risques de brûlures, de chocs électriques et d'incendie liés à la fonte du plastique.
- Il est recommandé d'utiliser des matériaux reconnus sans danger pour les aliments tels que le PLA (acide polylactique), le PP (polypropylène), le copolyester, le PET (polyéthylène téréphtalate), le PET-G (PET et glycol), le polystyrène HIPS et le nylon-6.

Equipements de protection individuelle (EPI) recommandés pour l'utilisation d'une imprimante 3D



Gants en nitrile pour protéger les mains des produits chimiques et des températures élevées.



Lunettes de sécurité pour protéger les yeux des éclaboussures de produits chimiques et des particules en suspension dans l'air.



Masque respiratoire pour protéger les voies respiratoires des émissions de particules fines et de gaz nocifs.

Mesures de sécurité que vous pouvez prendre lors de l'utilisation d'une imprimante 3D

Utilisez votre imprimante 3D dans une pièce bien ventilée pour éviter l'inhalation de particules fines et de gaz nocifs.

Portez des vêtements de protection pour éviter tout contact avec les produits chimiques et les températures élevées.

Évitez de toucher la buse chaude pendant l'impression pour éviter les brûlures.

Évitez de toucher les pièces chaudes pendant l'impression pour éviter les brûlures.

Évitez de toucher les pièces chaudes après l'impression pour éviter les brûlures.

Conclusion

Les nanotechnologies et les imprimantes 3D présentent de nombreux avantages et offrent des possibilités très prometteuses. Cependant, elles sont associées à des risques à court et à long terme. A court terme, les principaux risques émergents sont liés à la sécurité et à la confidentialité des données et des produits finaux. Les nanotechnologies et les imprimantes 3D peuvent être facilement utilisées à des fins illégales ou dangereuses, et les informations et les produits peuvent être volés ou piratés.

Les attaques informatiques et les cyberattaques sont l'une des principales menaces pour ces technologies. De plus, les imprimantes 3D peuvent produire des produits qui n'ont pas été testés et dont la qualité et la sécurité ne sont pas garanties.

A long terme, les principaux risques émergents sont liés à l'environnement et à la santé. Les nanotechnologies et les imprimantes 3D peuvent libérer des nano-particules et des produits chimiques qui peuvent être nocifs pour l'environnement et la santé humaine. De plus, les produits imprimés 3D peuvent contenir des matériaux qui ne sont pas biocompatibles et peuvent entraîner des effets nocifs à long terme. Les perspectives d'évolution des nanotechnologies et des imprimantes 3D sont très prometteuses.

Les recherches actuelles visent à améliorer la sécurité et la confidentialité des données et des produits finaux, à réduire les risques environnementaux et à améliorer la qualité des produits imprimés 3D.

Les nanotechnologies et les imprimantes 3D offrent également de nouvelles possibilités pour les secteurs de la santé, de l'énergie, de l'agriculture et de l'aérospatiale. Par exemple, les nanotechnologies peuvent être utilisées pour créer des dispositifs médicaux plus petits et plus efficaces. Les imprimantes 3D peuvent être utilisées pour fabriquer des pièces d'avions plus légères et plus résistantes.

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-fabriqua-t-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

Bibliographie

- 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

Bibliographie

- 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.rtb.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

Bibliographie

- 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-fabrique-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

Bibliographie

- 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.rtf.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

Bibliographie

- 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