

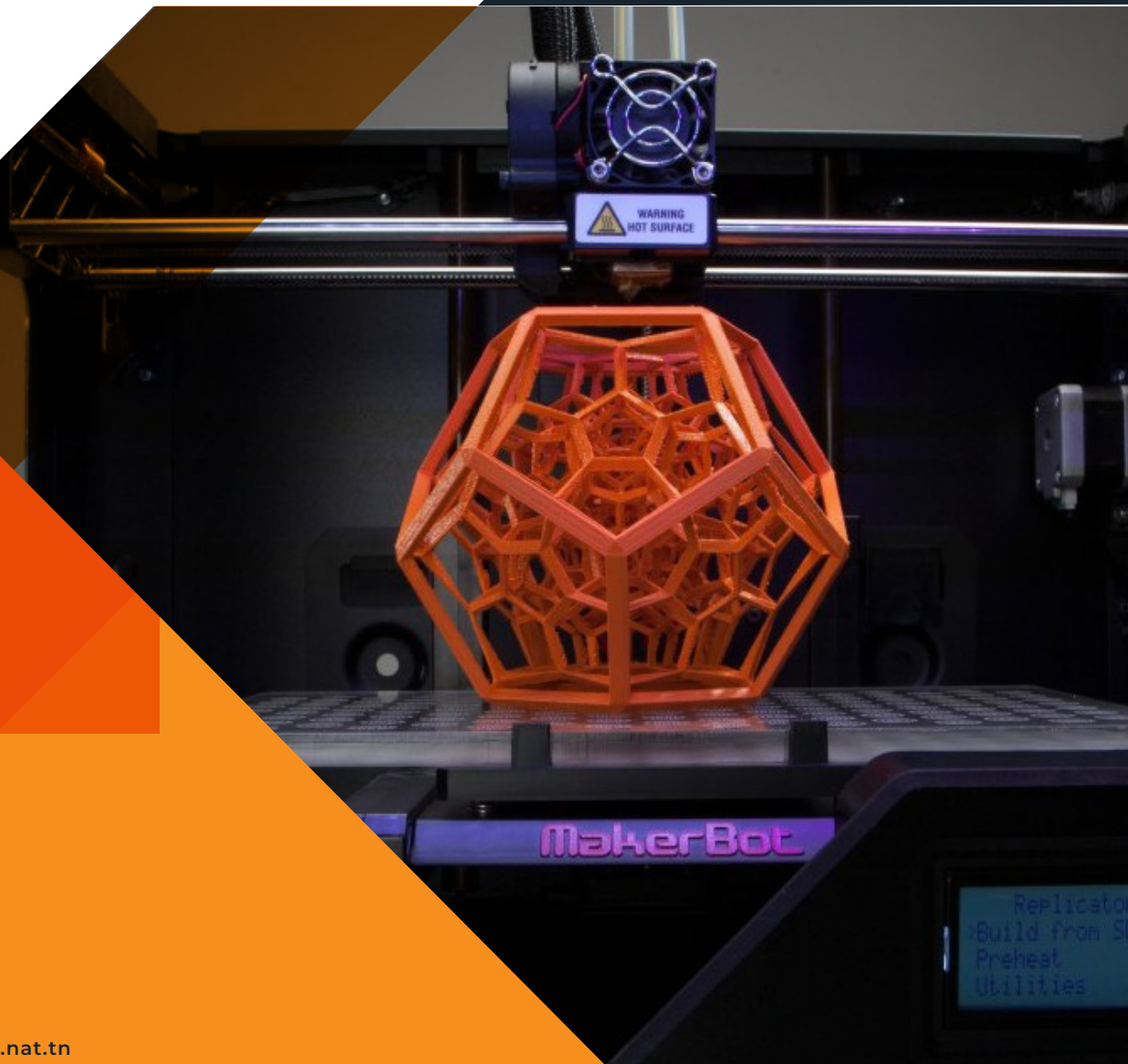


AGENCE DE PROMOTION
DE L'INDUSTRIE ET DE L'INNOVATION

CENTRE D'ETUDES ET
DE PROSPECTIVE INDUSTRIELLES

NOTE SUR L'IMPRESSION 3D

JANVIER 2018



SOMMAIRE

Introduction

I. La fabrication additive ou L'impression 3D

- I.1. Définition
- I.2. Fonctionnement de l'impression 3D
- I.3. Technologies et Matériaux de l'impression 3D
- I.4. Les Avantages de l'Impression 3D
- I.5. Normalisation
- I.6. Les champs d'application de l'impression 3D
- I.7. Impression 3D / Procédés traditionnels

II. L'impact de l'installation de l'impression 3D sur la chaîne de production

III. Analyse SWOT

IV. Le Marché Mondial de l'Impression 3D

- IV.1. Situation du marché
- IV.2. Répartition géographique
- IV.3. Les secteurs utilisateurs
- IV.4. Les tendances de la fabrication additive

V. Les stratégies mises en place par les pays occidentaux pour soutenir la fabrication additive

- V.1. Cas des Etats Unis
- V.2. Cas de l'Allemagne
- V.3. Cas du Royaume-Uni
- V.4. Cas de la France

VI. Le développement de la fabrication additive en Tunisie

- VI.1. Situation nationale
- VI.2. Recommandations

VII. Exemples de projets

Bibliographies

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Les matériaux utilisés pour l'impression 3D

Figure 2 : les principales raisons d'utilisation de l'impression 3D

Figure 3 : Evolution du marché mondial (Vente de matériels et services associés) entre la période (2013-2020)

Figure 4 : Part de marché des fabricants de systèmes

Figure 5 : Part de marché des fournisseurs de services

Figure 6 : Répartitions des recettes du marché de l'impression 3D par région

Figure 7 : Evolution de ventes mondiales des imprimantes 3D

Figure 8 : Répartition de ventes des imprimantes 3D par les grandes régions (moyenne entre 2012-2015)

Figure 9 : Secteurs d'application (part en % de l'ensemble du marché à destination des professionnels)

Figure 10 : Les matériaux imprimés en 3D que les interrogés veulent voir dans l'avenir

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Comparaison des Technologies d'Impression 3D

Tableau 2 : Liste des normes publiées en matière d'impression 3D

Tableau 3 : Comparatif entre l'impression 3D et techniques de fabrication traditionnelles

Tableau 4 : Matrice SWOT de la fabrication additive

Tableau 5 : Plan d'actions

ACRONYME

CAO : Conception Assistée par Ordinateur

ASTM: American Society for Testing and Materials

ISO: International Standards Organisation

CENELEC: European Committee for Electrotechnical Standardization

PME : Petite Moyenne Entreprises

TPE : Très Petite Entreprises

E&Y: Ernst & Young

FabLab: Fabrication Laboratory

IoT : Internet Of Things

CNC: Comput Numerical Control

NIST: National Institute of Standards and Technology

FAA : Federal Aviation Administration

ENSA: Economics of National Security Association

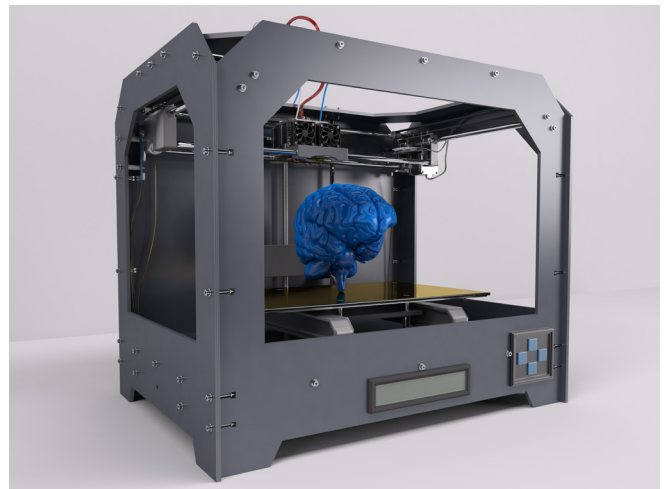
INTRODUCTION

La technologie de l'impression en 3D ou la fabrication additive remonte à l'année 1988. Perçue dans ses débuts comme une innovation visionnaire, cette technologie s'est imposée depuis l'année 2010 comme un outil de production avec des avantages indéniables dans les processus de fabrication de pièces très variées : comme les objets d'art, les prototypes ou les pièces pour des secteurs aussi pointus tels que l'automobile ou l'aéronautique. Elle est apparue, au moins dans la perspective dominante, pour être plus une nouveauté qu'un outil pratique pour faire progresser la fabrication.

En effet, des avancées technologiques réalisées en 2010 ont permis de réduire les coûts et de rendre cette innovation plus accessible pour les utilisateurs. A présent, l'impression 3D a atteint un point d'inflexion de sorte qu'elle peut intégrer désormais toute la chaîne de valeur manufacturière.

Cette nouvelle technologie est une forme de production sans équivalent :

- Les pièces à fabriquer sont conçues sans avoir besoin d'outillages et reviennent donc moins chères.
- L'impression tridimensionnelle est économe en énergie et génère peu de résidus donc elle est respectueuse de l'environnement.
- Les pièces fabriquées sont plus légères et d'une durée de vie plus longue.

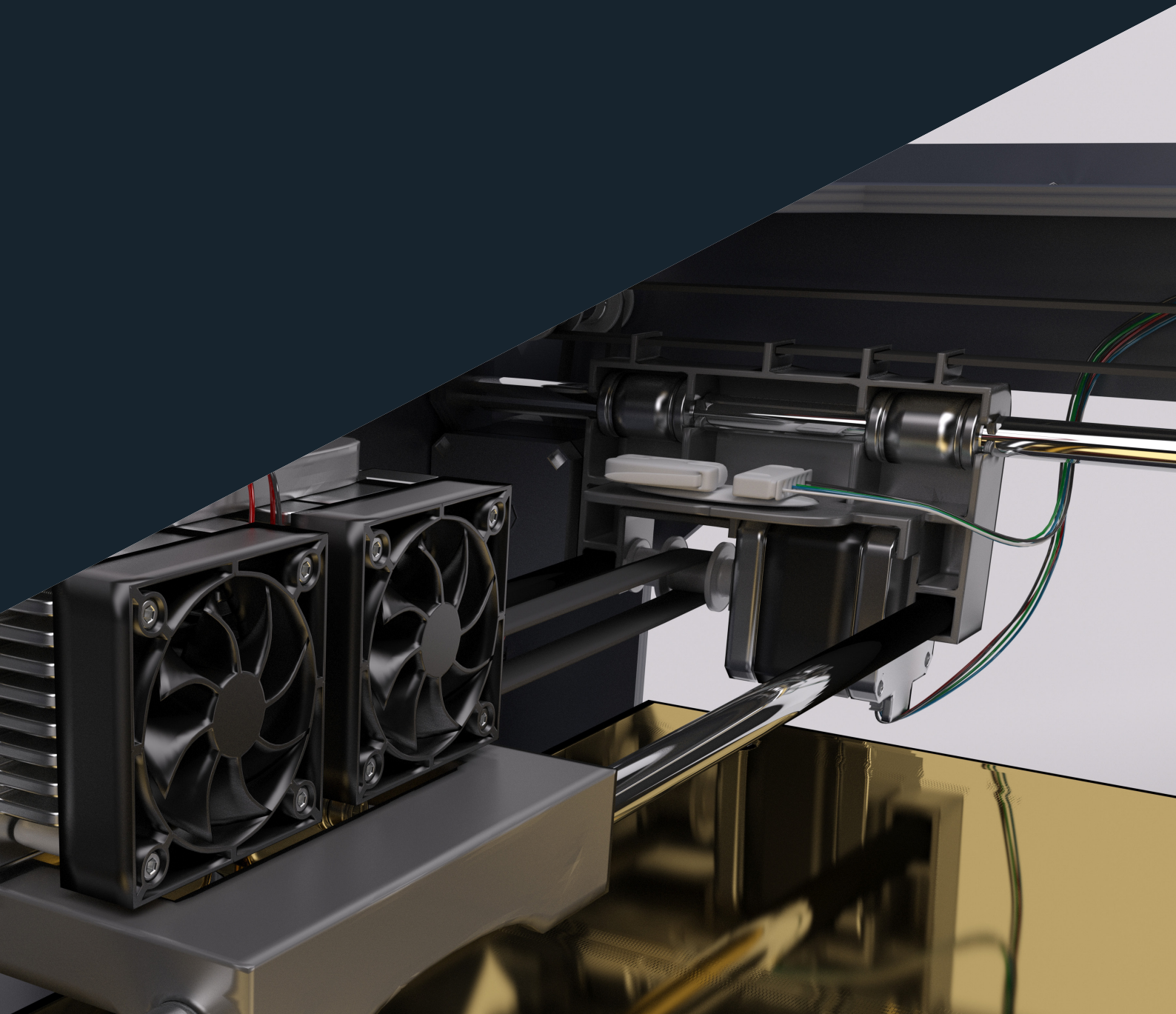


Actuellement, la petite imprimante tridimensionnelle peut être obtenue à moins de 500 \$. La plupart des pays industrialisés ont mis en place des stratégies pour développer cette technologie qui sera l'assise de l'industrie de futur.

La présente note propose dans une première partie une revue documentaire sur l'impression 3D : ses définitions, ses matériaux, ses techniques, ses normes,..., etc. En deuxième parties, elle analyse l'impact de cette technologie sur la chaîne de valeur industrielle en détaillant les avantages et les inconvénients. En outre, cette note donnera un aperçu sur la situation du marché mondial de l'impression 3D ainsi que les stratégies adoptées pour propulser les technologies numériques et particulièrement la fabrication additive dans des pays comme les Etats unis, le Royaume uni, l'Allemagne et la France.

En conclusion, cette note présente un aperçu sur la technologie d'impression 3D en Tunisie et formule des recommandations à l'image de ce qui se fait dans les pays industrialisés en vue de promouvoir la fabrication additive sur le plan national et propose trois fiches projets dans ce secteur porteur.

I. LA FABRICATION ADDITIVE OU L'IMPRESSION 3D



I.1. DÉFINITION

L'impression 3D ou la fabrication additive est un processus de fabrication d'objets solides tridimensionnels à partir d'un fichier numérique.

L'objet imprimé en 3D est créé en superposant des couches de matériaux. Chacune de ces couches peut être considérée comme une coupe transversale horizontale mince de l'objet temporaire. Ce procédé s'appelle aussi processus additif.

L'impression 3D est l'opposé de la fabrication soustractive qui coupe ou creuse un morceau de métal ou de plastique avec des machines conventionnelles. Elle permet de créer des formes complexes (fonctionnelles) en utilisant moins de matériaux que les procédés de fabrication traditionnelles.

I.2. FONCTIONNEMENT DE L'IMPRESSION 3D

En premier lieu, il convient de dessiner la forme souhaitée sur un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Il existe un nombre important de logiciels sur le marché qui permettent de créer ses modèles 3D (certains sont gratuits et/ ou open source d'autres sont propriétaires). Les plans sont ensuite transmis à l'imprimante.

En deuxième étape, l'imprimante traite cette modélisation 3D conformément à la logique de fabrication additive : c'est-à-dire découper la modélisation 3D en couches 2D grâce à un logiciel approprié.

Autour de ces deux grandes fonctions, d'autres logiciels sont intégrés notamment pour assurer la communication entre l'imprimante et les ordinateurs.

L'imprimante 3D reçoit donc une série d'instructions qu'elle va restituer en objets 3D. Plusieurs technologies existent pour passer de couches 2D à un objet 3D.

Deux grands types de procédés sont en fait utilisés pour former les objets :

- Soit la matière travaillée peut entrer en fusion et en quel cas, elle peut être fondue peu à peu pour obtenir la forme souhaitée. (Exemple : Plastique)
- Soit la matière peut être solidifiée sous l'action de la chaleur ou de la lumière (laser). (Exemples : Résine ou alliage de titane)

Mais dans les deux cas, l'imprimante 3D « pense » couche par couche pour obtenir la forme 3D. Chacun des méthodes implique des qualités propres qui jouent sur la durée nécessaire à l'obtention de l'objet mais aussi la taille limite des objets.

Après une étape de fabrication additive, le produit n'est ni terminé ni prêt à l'emploi. Il nécessite :

- Un nettoyage, un enlèvement des supports, un polissage, un sablage, un grenaillage;
- Un usinage ;
- Un traitement thermique ;
- Etc.

Ces opérations de finition et parachèvement concernent surtout les pièces métalliques.

I.3. TECHNOLOGIES ET MATÉRIAUX DE L'IMPRESSION 3D

De nombreuses technologies d'impression 3D sont déjà disponibles sur le marché, et un certain nombre sont en cours de développement. Chacune de ces technologies requiert un type de matériau d'impression 3D différent: filaments plastique en bobines (PLA, ABS...), résines liquides photosensibles, poudres (métal, plastiques...) etc.

Chaque technologie d'impression 3D présente des avantages spécifiques et est adaptée pour des applications particulières.

Il existe trois grandes catégories de technologies d'impression 3D :

- Dépôt de fil ou extrusion (FFF et FDM): un filament plastique est fondu par la tête d'impression de l'imprimante 3D et déposé sur la plateforme d'impression de l'imprimante 3D pour créer l'objet voulu, couche par couche.
- Résine (SLA et DLP) : une résine liquide photosensible est polymérisée (solidifiée) de manière très précise par un laser ou un projecteur, formant ainsi l'objet voulu directement dans le bac de l'imprimante 3D contenant la résine. La technologie la plus courante utilisant la photopolymérisation (solidification de la résine photosensible par la lumière) est l'impression 3D par stéréolithographie (SLA).
- Poudre (SLS, SLM, DMLS...) : un matériau sous forme de poudre est disposé dans le bac de l'imprimante 3D. Une

source d'énergie, en général un laser, est utilisée pour fusionner les grains de poudre et forme une structure solide. On parle principalement d'impression 3D par frittage laser ou frittage de poudre (SLS pour Selective Laser Sintering), même si des variantes de cette technologie existent (SLM pour Selective Laser Melting notamment).

Le tableau ci-après, présente une comparaison exhaustive des technologies d'impression 3D :

Tableau 1 : Comparaison des Technologies d'Impression 3D

Technologie	Procédé de fabrication	Avantages	Inconvénients	Matériaux
Modelage par dépôt de fil	Extrusion de matériau	Pièces solides	Mauvaise qualité de finition et lent	Plastique et Alumide
		Facile à imprimer	Requiert du support	
Frittage par Laser Sélectif	Poudre	Aucun support requis	Précision limitée à la finesse de la poudre	Plastique et Alumide
	Lit de Fusion	Haute résistance Thermique et Chimique -Très rapide	Surface finie rugueuse	
Fusion Laser Directe de Métal	Poudre	Composants denses	Etape de finition obligatoire	Métal ou cuivre
	Lit de Fusion	Géométries complexes		
Fusion par faisceau d'Electrons	Poudre	rapidité d'impression	Etape de finition obligatoire	Métal ou cuivre
	Lit de Fusion	Meilleure précision	Utilisation de rayons X	
Stereolithographie	Photopoly-mérisation	Géométries complexes	Etape de finition obligatoire	Résine
		Bonne précision	Nécessite du support	
Continuous Liquid Interface Production		Impression simultanée de plusieurs objets	Limite d'épaisseur	
		Formes et tailles complexes	Choix élargi de résines simulant différentes propriétés	
		Haute précision		
Traitement par lumière numérique		Impression simultanée de plusieurs objets	Limite d'épaisseur	
		Formes et tailles complexes	Gamme limitée de matériaux	
		Haute précision		

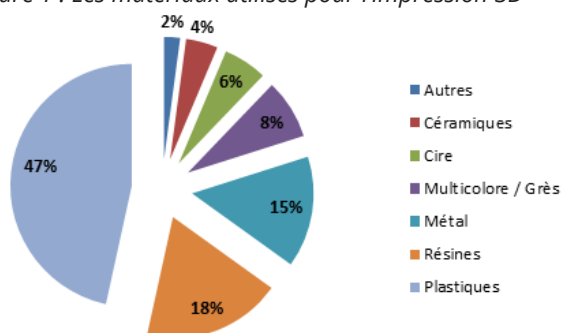
Technologie	Procédé de fabrication	Avantages	Inconvénients	Matériaux
Multijet et Polyjet	Projection de matériau	Haute précision	Procédé de fabrication lent	Résine / Multicolore
		Bon aspect final		
		Nombreux matériaux et couleurs possibles		
Projection de Liant	Projection	Prix réduit	Matériaux limités	Multicolore
		une impression en couleurs	Objets fragiles	
		Rapide		
Laminage par dépôt sélectif	Laminage de feuilles	Prix faible	Manque de précision	Multicolore
		Pas de matériaux toxiques	Pièces non homogènes	
		Fabrication rapide de grandes pièces		

Source : <https://www.sculpteo.com/fr/impression-3d/technologies-dimpression-3d/>

Selon l'enquête réalisée par Sculpteo au premier semestre de l'année 2017 auprès des utilisateurs de l'impression 3D, la technologie par dépôt de filament fondu (FDM) est la première méthode pratiquée dans le monde avec 36%. Suivies des technologies Stereolithography (SLA) et Selective Laser Sintering (SLS) avec 34% et 25% respectivement. Cela dénote en effet, à un développement significatif de l'impression 3D du métal aux cours de ces dernières années en raison de ses excellentes caractéristiques mécaniques.

Toutefois, le plastique demeure encore la première matière utilisée par les utilisateurs de la fabrication additive avec 47%. La résine arrive en deuxième position avec 18% et la part de métal est de 15%.

Figure 1 : Les matériaux utilisés pour l'impression 3D



Source : Enquête Sculpteo 2017

1.4. LES AVANTAGES DE L'IMPRESSION 3D

En plus de l'avantage de cette technologie dans le prototypage 3D, elle est de plus en plus utilisée pour créer des produits finis. Les raisons d'utilisations sont multiples, à savoir :

La rapidité : l'impression 3D permet d'éviter la création de moules d'injection de plastiques ou de moules pour pièces en métal, particulièrement coûteuse et longue (4 à 6 semaines), il est évidemment plus facile et rapide de produire un fichier 3D qu'un moule.

La maîtrise des coûts : Avec l'impression 3D la perte des matériaux est beaucoup moins importante que dans les techniques traditionnelles dites soustractives. A titre d'exemple, la perte de matière dans la fonderie métallique est de l'ordre de 50% alors qu'elle est nulle via les techniques d'impression 3D d'un métal par fusion laser.

La personnalisation : il est aisé de personnaliser un produit en modifiant le fichier 3D, alors qu'avec un moule toute personnalisation du produit est impossible à moins de produire un nouveau moule. La notion de Mass customization (ou customisation de masse) est au cœur de la réflexion des projets de l'impression 3D.

La précision avec la qualité de la haute résolution : une impression 3D haute résolution est désormais possible grâce aux techniques de laser. La précision est de l'ordre du micro dans l'impression 3D par fusion laser. Ces performances permettent de produire des objets à haute valeur ajoutée et avec une grande résolution.

La Gestion du stock : Dans les industries de pointe initiatrices de l'impression 3D, la notion de « Spare part on demand », ou pièces détachées à la demande, est d'une importance capitale. Plusieurs raisons à cela : limiter la dépendance à son fournisseur ; donner vie à des pièces qui ne sont plus sourçables ; éviter les rayonnages de pièces, encombrants et coûteux. L'impression 3D est là aussi une réponse adaptée pour obtenir des pièces imprimées pas chères et rapidement.

La relocalisation : l'impression 3D permet aujourd'hui de produire des milliers de pièces avec une nationalité économique à la demande. Cela n'était pas le cas il y a encore quelques années.

C'est clairement une opportunité pour les entreprises des pays industrialisés pour rapatrier des projets qui ont parti auparavant vers les ateliers du monde comme la Chine ou l'Inde. En outre, les pays émergents comme le notre peuvent en bénéficier pour produire les pièces de rechange des machines industrielles.

I.5. NORMALISATION

Malgré l'évolution remarquable enregistrée par la fabrication additive depuis 2008, la normalisation en la matière n'a pas suivi le même rythme de développement, ce qui représente un frein pour une intégration plus forte de cette technologie dans la chaîne de valeur industrielle. En effet, les normes sont importantes car elles fournissent des exigences, des spécifications et des lignes directrices ou des caractéristiques pour que les matériaux, les produits, les procédés de transformations et les services soient adaptés aux besoins. De plus, les normes contribuent à éliminer les obstacles techniques au commerce, permettent l'accès à de nouveaux marchés et à la croissance économique. Elles facilitent également le transfert de technologie.

A cet effet, les organismes de réglementation actifs dans le domaine ASTM, ISO et CEN CENELEC ont constitué des comités techniques pour consolidation et appropriation des réglementations de la fabrication additive. En 2016, les trois organismes de normalisation ont signé un accord de collaboration pour l'élaboration de normes communes basées sur 3 plans :

- Des normes générales (concepts généraux et exigences communes)
 - Des normes de catégories (exigences spécifiques propres aux différentes catégories de processus ou matériaux)
 - Des normes spécialisées (exigences relatives à un matériau, à un procédé ou à une application spécifique)
- qui contribuent à assurer la sécurité des produits
- Jusqu'à présent, les comités techniques constitués sont parvenu à publier 7 normes portant sur les principes généraux de la fabrication additive. Ces comités œuvrent, actuellement, sur 12 projets de normes concernant notamment les matières premières, les processus du contrôle non destructif et les directives de conception. Ci-dessous la liste des normes publiées :

Tableau 2 : Liste des normes publiées en matière d'impression 3D

Technologie	Procédé de fabrication
ISO 17296-2:2015	Fabrication additive -- Principes généraux -- Partie 2: Vue d'ensemble des catégories de procédés et des matières premières
ISO 17296-3:2014	Fabrication additive -- Principes généraux -- Partie 3: Principales caractéristiques et méthodes d'essai correspondantes
ISO 17296-4:2014	Fabrication additive -- Principes généraux -- Partie 4: Vue d'ensemble des échanges de données
ISO/ASTM 52900:2015	Fabrication additive -- Principes généraux -- Terminologie
ISO/ASTM 52901:2017	Fabrication additive -- Principes généraux -- Exigences pour l'achat de pièces
ISO/ASTM 52915:2016	Spécification normalisée pour le format de fichier pour la fabrication additive (AMF) Version 1.2
ISO/ASTM 52921:2013	Terminologie normalisée pour la fabrication additive -- Systèmes de coordonnées et méthodes d'essai

Source : ISO

I.6. LES CHAMPS D'APPLICATION DE L'IMPRESSION 3D

Les applications de la fabrication additive couvrent à présent de nombreux secteurs d'activité allant de la formation jusqu'à la production industrielle, et embrassent toute la chaîne de valeur du prototypage jusqu'au service après-vente. On cite, dans ce qui suit, les principaux domaines d'application de la fabrication additive dans le monde et qui peuvent avoir des échos en Tunisie.



Ce sont surtout les industries de pointe qui tirent parti pour le moment du potentiel des imprimantes 3D.

L'impression en 3D peut répondre à plusieurs besoins de l'industrie aéronautique, en particulier la production de moules et de noyaux de sable imprimés pour les prototypes et la production des pièces moulées et des composants métalliques imprimés utilisant les superalliages à base de nickel.

De plus, l'impression 3D permet un gain de poids pour les pièces en plastique et offre une meilleure isolation électrique. L'utilisation des thermoplastiques représente une solution idéale pour la fabrication de composants des avions, en raison de leur légèreté et résistance à la chaleur.

L'imprimante 3D permet en outre de créer des pièces résistantes à la chaleur, aux substances chimiques et aux rayons ultra-violet et n'absorbant pas l'humidité. Actuellement, les grands groupes industriels tels qu'Airbus, Boeing, GE, et bien d'autres ont déjà utilisé cette technologie d'impression 3D pour améliorer leur productivité et baisser leurs coûts de revient.



L'industrie automobile a été l'un des premiers secteurs à adopter la fabrication d'additifs, intégrant les systèmes d'impression 3D dans le prototypage rapide des moteurs et des composants de moteurs, des boîtiers de transmission et plus encore.

En effet, la chaîne de production représente l'un des grands freins aux concepteurs dans l'industrie automobile : la fabrication des pièces est standardisée et tout changement implique évidemment d'importants investissements. Pour cette raison, les concepteurs en ce secteur ont fait recours à l'impression 3D pour prototyper et fabriquer plus rapidement.

Les applications comprennent des culasses, des collecteurs d'admission et des blocs de moteur. L'impression 3D est également utilisée dans le cycle de développement des moteurs pour les voitures particulières et les moteurs de course.



LE MÉDICAL

On considère le secteur médical comme l'un des adeptes phares de l'impression 3D, qui offre à cette technologie un énorme potentiel de croissance en raison des options de personnalisation et de l'amélioration de la vie des gens au fur et à mesure que ces procédés sont actualisés et que les matériaux sont développés.

Les technologies d'impression 3D sont utilisées pour diverses applications. À part la création de prototypes dans le secteur médical et dentaire, ces technologies sont utilisées pour créer des moules de couronnes dentaires et des outils pour réaliser des bagues orthodontiques ; et pour fabriquer d'appareils médicaux sur mesure tels que les prothèses auditives, les semelles orthopédiques, les prothèses personnalisées et les implants uniques.

Les guides chirurgicaux imprimés en 3D pour des opérations. Les développements de cette technologie ont permis également l'impression 3D de la peau, des os, du tissu, des médicaments et même des organes humains. Néanmoins, ces technologies sont encore largement éloignées de la commercialisation.

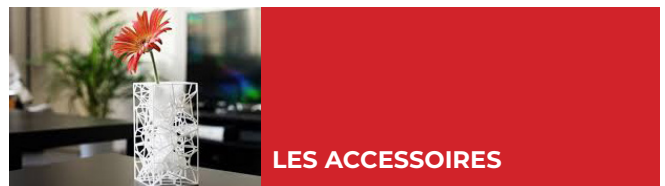


L'ARCHITECTURE

L'imprimante 3D permet aux cabinets d'architecture, aux bureaux d'études ou studios de design d'avancer rapidement en créant des modèles résistants et complexes à partir de données CAO issues d'un logiciel d'architecture ou de design.

Les modèles d'impression 3D sont lisses et donnent des maquettes détaillées dans une large gamme de matériaux dont les photopolymères, y compris ceux rigides prêts pour la peinture.

L'application de la fabrication additive dans ce domaine permet de réduire considérablement le temps et les dépenses de production des maquettes. Elles nécessitant souvent des détails très précis imprimées en 3D et sont également plus résistantes que les modèles traditionnels.



LES ACCESSOIRES

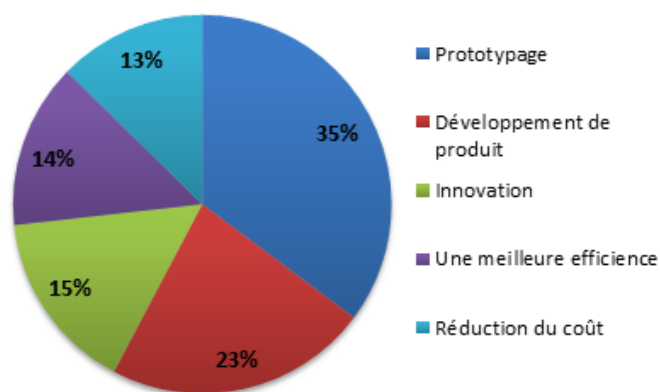
Outre ses applications dans le domaine industriel, l'impression 3D s'adresse plus directement aux consommateurs via la fabrication d'accessoires personnalisés. Les impressions les plus courantes concernent généralement des objets décoratifs comme des vases mais aussi des accessoires tels que des presse-agrumes, des coquetiers, des porte-crayons, des porte-clefs,..., etc.

I.7. IMPRESSION 3D / PROCÉDÉS TRADITIONNELS

Le prototypage (35%), le développement de produit (23%) et l'innovation (15%) sont les trois raisons les plus courantes pour lesquelles les entreprises poursuivent l'impression en 3D.

En fait, pour la grande série et les applications standards, les procédés traditionnels sont incontournables.

Figure 2 : les principales raisons d'utilisation de l'impression 3D



Source : rapport de Wohlers

L'impression 3D peut accélérer le développement et la livraison des produits personnalisés et apporter une flexibilité accrue grâce à une meilleure gestion des stocks et à une fabrication en temps réel des produits ayant une demande variable.

D'autres avantages sont offerts par l'impression 3D, à savoir : les avantages liés à la fabrication de petits lots, et les avantages de coûts basés sur l'efficacité de certaines applications et une flexibilité sans précédent dans de nouveaux marchés.

L'impression 3D peut également améliorer la qualité grâce à des pièces plus légères, une meilleure ergonomie et plus de liberté dans la phase de conception. Toutefois, l'instabilité du processus peut affecter négativement la qualité ainsi que la faible reproductibilité peut ainsi altérer la durabilité du produit.

Elle a remplacé quelques techniques de fabrication traditionnelles, telles que l'extrusion de métal et les techniques de modélisation manuelle pour la fabrication de prototypes. Néanmoins, cette technologie demeure un nouveau moyen de production, supplémentaire et complémentaire, qui ne remplacera pas totalement les centres d'usinage à commande numérique et les retouches de finition aux interfaces restant toujours nécessaires. De ce fait, il est primordial de déterminer les besoins et les priorités afin de prendre la décision entre l'impression 3D et les procédés de fabrication traditionnelle.

Le tableau ci-dessous présente une comparaison entre l'impression 3D et les techniques de fabrication traditionnelles (usinage, moulage, etc.) :

Tableau 3 : Comparatif entre l'impression 3D et techniques de fabrication traditionnelles

Procédé	Volume	Coût par unité	Délai de livraison	Coût de la complexité
Fabrication additive	Petite série, Hautement personnalisée	Coût variable très élevé, Pas de coût fixe	Très court (<= 1 jour)	Pas plus élevé que les pièces simples
Fabrication traditionnelle	Grande série, Standard (non personnalisée)	Coût variable bas, Coût fixe très élevé	Très lent à modérément lent	Plus élevé que les pièces simples

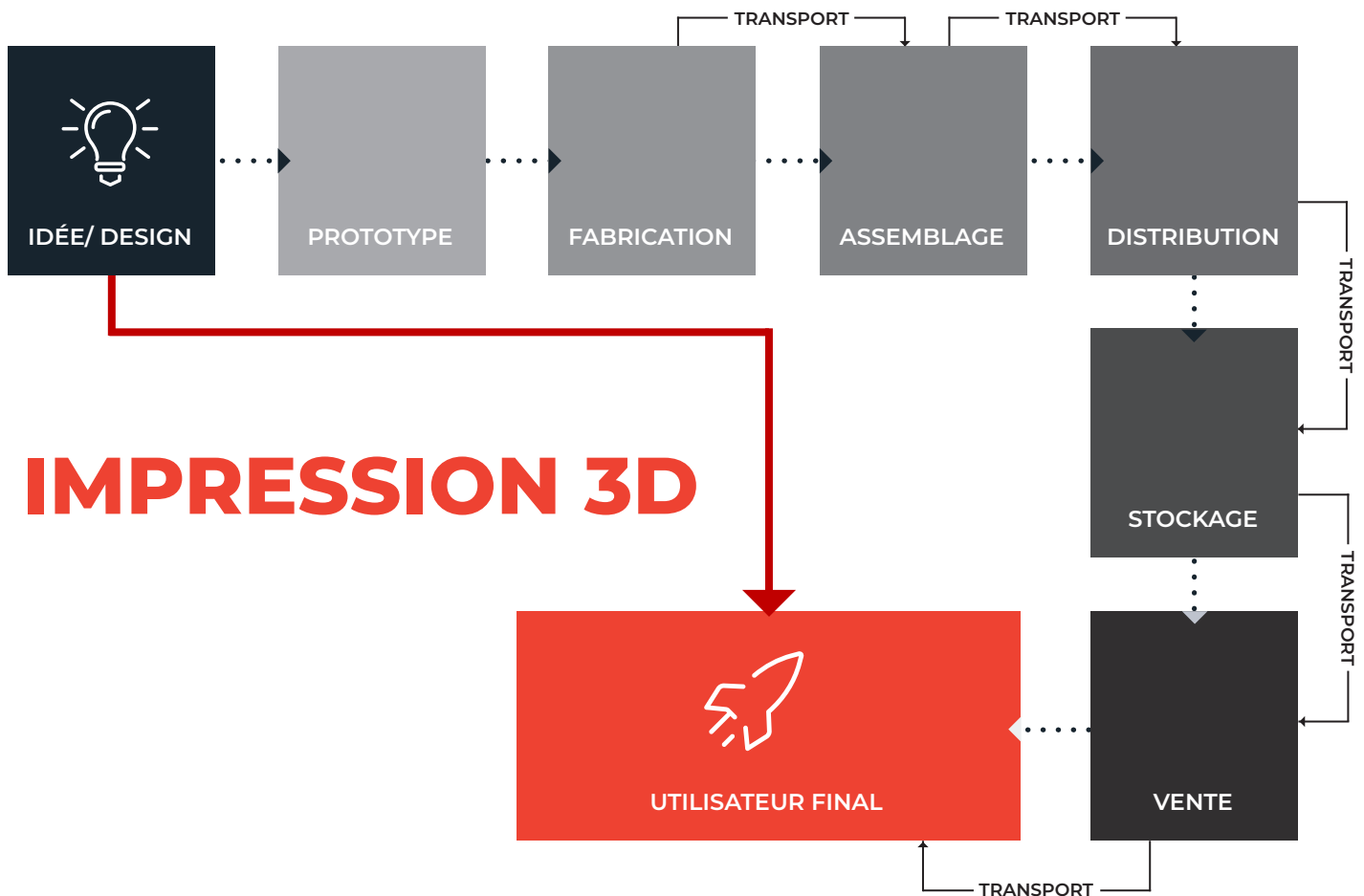
Source : rapport de Wohlers

II. IMPACT DE L'IMPRESSION 3D SUR LA CHAÎNE DE PRODUCTION



La fabrication additive a un impact positif sur les chaînes d'approvisionnement d'une organisation. En effet, elle permet de réduire les délais ainsi que les coûts de fabrication des pièces et d'inventaire.

Par exemple, dans des situations où de longs délais sont pénalisants pour les entreprises, l'impression 3D permet de répondre à la demande en temps réel. Cela leur permet également de limiter les investissements relatifs au transport, au stockage et aux inventaires, puisqu'en fabriquant à la demande, on évite de produire en grande quantité et de stocker.



Source : *Impression 3D- 1ère édition : du Mathilde Berchon-Editeur Eyrolles*

A noter que ces machines offrent l'avantage d'être multi-usages, capables de réaliser des pièces de moteur comme des prothèses médicales. Ainsi, par leur polyvalence, elles permettent de réduire considérablement les coûts d'investissements liés à la fabrication, contrairement aux chaînes de production actuelles, où chaque machine a un rôle précis et chaque changement suppose l'acquisition de nouveaux équipements très coûteux.

De plus, l'impression 3D permet de diminuer le coût du matériel de montage étant donné que les objets fabriqués nécessitent moins d'assemblage.

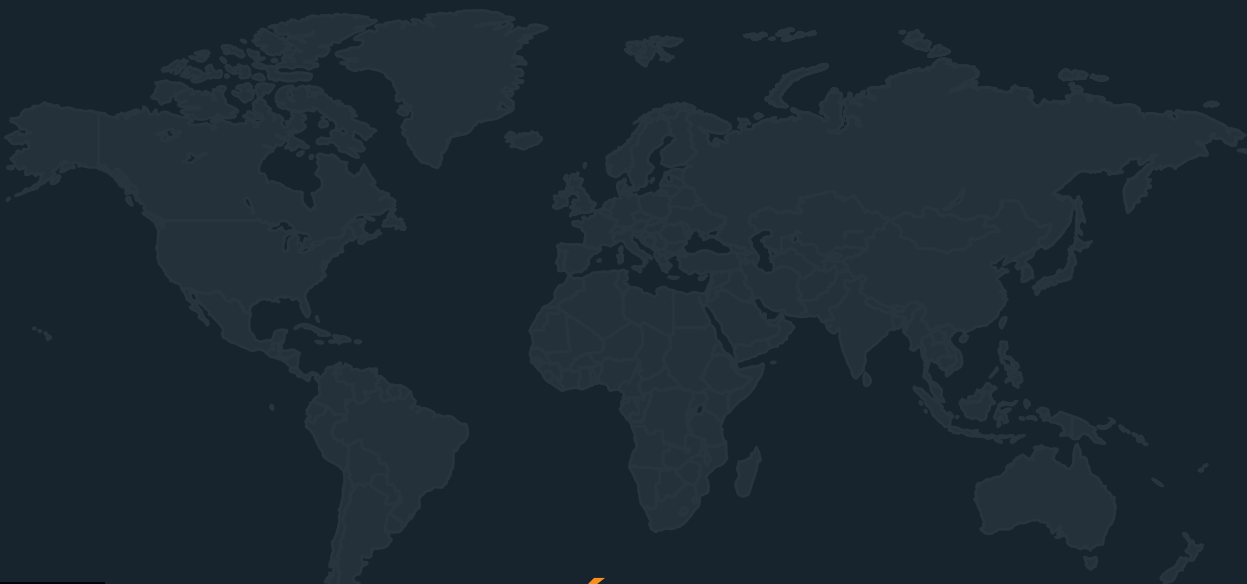
Pour autant, l'impression 3D n'est pas encore en phase de remplacer l'ensemble du parc industriel. La technologie en est à ses débuts et, pour le moment, elle s'adapte mal au passage à l'échelle.

III. ANALYSE SWOT

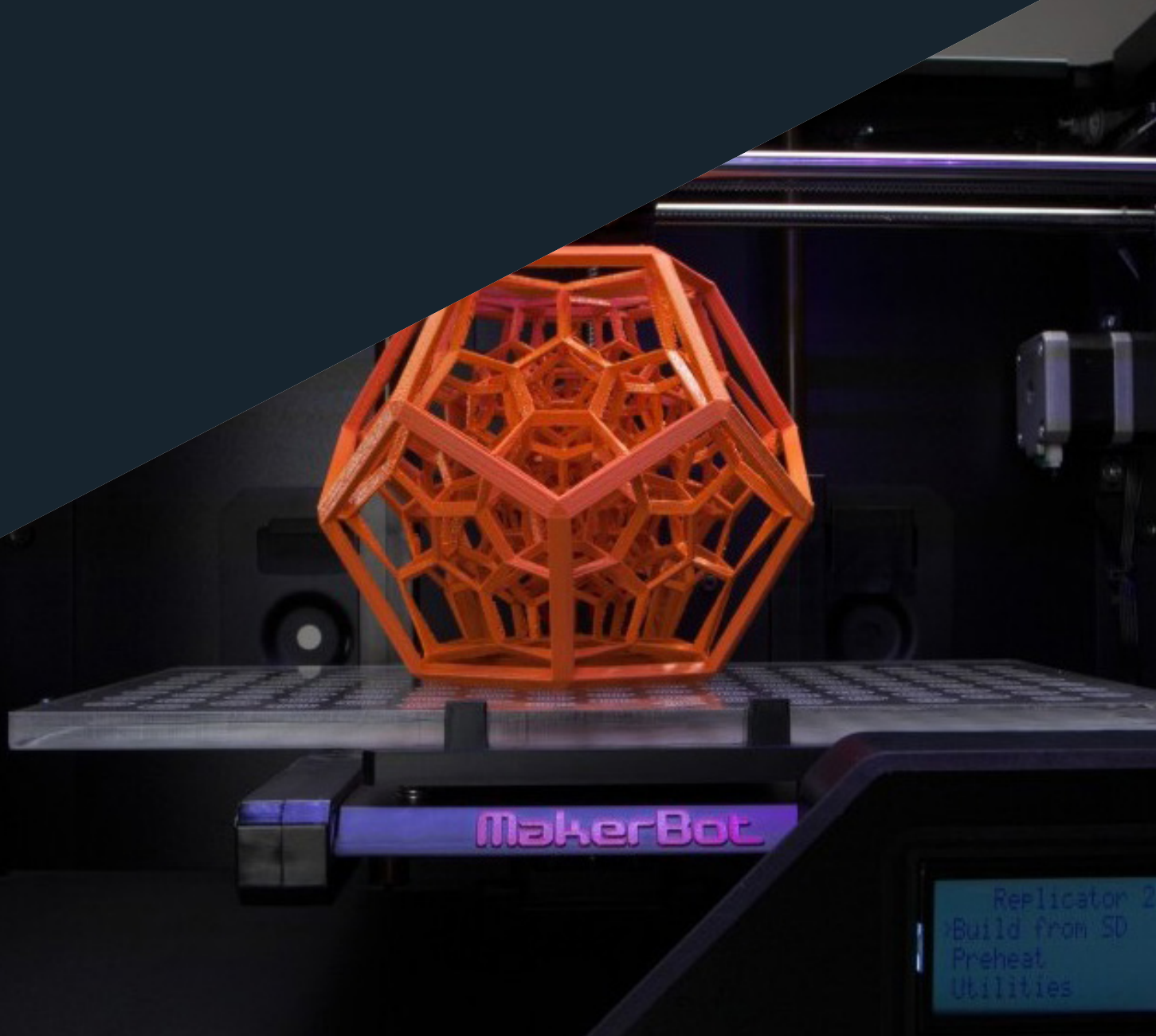
La fabrication additive se distingue par sa rapidité, la possibilité de fabriquer plus aisément des pièces comportant des canaux internes, le recours à des structures lattices permettant l'allègement des pièces ou une fabrication multi-matériaux. Elle permet également de diminuer les assemblages et de faciliter la personnalisation. Cependant, il existe quelques obstacles qui freinent le déploiement de cette technologie, notamment dans la production en masse. Ci-dessous une analyse SWOT exposant les forces et faiblesses de cette technologie mais aussi les opportunités et menaces y afférente.

Tableau 4 : Matrice SWOT de la fabrication additive

ATOUTS	FAIBLESSES
- Réduction des délais de fabrication ; - Conception innovante et optimisée ; - Diminution des opérations d'assemblages ; - Production des formes complexes impossibles à obtenir avec les techniques classiques de moulage et d'usinage ; - Production des produits personnalisés ; - Réalisation de pièces de petites dimensions ; - Gain en termes de temps et élimination des coûts liés à l'outillage ; - Recyclage des poudres relativement facilement ; - Réduction de la quantité des matières utilisées ; - Diminution des stocks ; - Délocalisation/décentralisation facile de la production (avec des imprimantes connectées WiFi).	- Prix des machines reste élevé ; - Temps de réalisation demeurent encore trop long, comparés à ceux des chaînes de production de masse optimisées ; - Matériaux chers et peu variés ; - Résines photosensibles sont mono-utilisation ; - Taille des pièces limitée par la capacité de la machine (en général 300 x 300 x 300 mm) ; - Technologies de fabrication additive ne permettent pas d'assurer une reproductibilité de certaines pièces ; - Caractéristiques mécaniques et qualité des états de surface obtenues peuvent rester éloignées de celles attendues (rugosité, contraintes résiduelles élevées, porosité ...). - Certification de ces technologies (normes procédés et matériaux) : Les nombreux matériaux, machines et procédés rendent l'élaboration de standards pour la qualification et la certification compliquée.
OPPORTUNITÉS	MENACES
- Applications « phares » dans les domaines de l'aéronautique, tel que l'injecteur de carburant ; - Accès facile à la technologie pour une TPE/PME ; - Développement de nouveaux matériaux ; - Émergence de nouveaux fabricants et distributeurs de matières premières ; - Développement de machines hybrides (machines combinant procédés additifs et soustractifs) ; - Démocratisation de la technologie en partie grâce à l'expiration de certains brevets ; - Développement en cours pour fiabiliser les équipements et améliorer les caractéristiques mécaniques de pièces ; - Augmentation des capacités des équipements et de la puissance des sources d'énergie.	- Thématique encore peu intégrée au sein des programmes de l'enseignement ; - Propriété intellectuelle posera bientôt un problème car la reproduction d'objets sera facile: l'utilisation systématique d'un fichier 3D (peut ensuite être dupliqué) et les banques de données de modèles CAO rendent la notion de droit d'auteur plus délicate à gérer.



IV. LE MARCHÉ MONDIAL DE L'IMPRESSION 3D

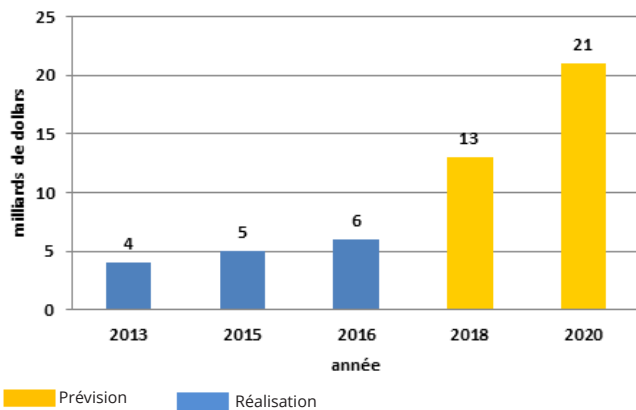


IV.1. SITUATION DU MARCHÉ

Le marché mondial de l'impression 3D est en pleine croissance depuis quelques années. En effet, le marché global de cette technologie est passé de 4 milliards de dollars en 2013 à 6 milliards de dollars en 2016, soit un taux de croissance annuel moyen de 14%.

Les prévisions estiment que l'industrie mondiale de l'impression 3D atteindra les 13 milliards de dollars en 2018 et dépassera les 21 milliards de dollars d'ici 2020. Cette croissance est due essentiellement à l'évolution du marché primaire à savoir les systèmes d'impression 3D, les matériaux, les fournitures et les services. Celui-ci a augmenté d'au moins 30% par an de 2012 à 2014.

Figure 3 : Evolution du marché mondial (Vente de matériels et services associés) entre la période (2013-2020)

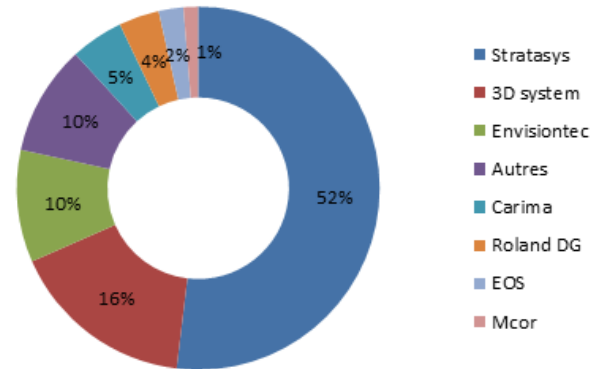


Source : rapport de Wohlers (2017)

Bien que le nombre des acteurs de l'impression 3D soient nombreux, seules quelques entreprises détiennent la grande partie du marché. Selon l'enquête menée par le cabinet E&Y, les entreprises Stratasys, 3D Systems et EOS représentaient environ 70% des parts de marché de fabrication en 2015. De même, le marché des fournisseurs de services est dominé par les deux acteurs suivants: Materialise et Proto Labs avec 68%.

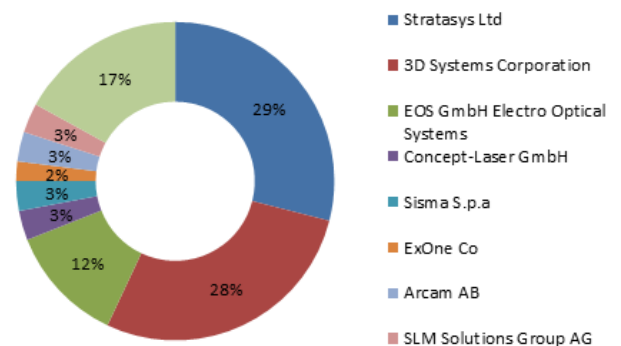
La même étude a montré également que les fabricants des systèmes représentaient environ 55% du marché total de la fabrication additive, alors que les fournisseurs de services représentaient environ 25%.

Figure 4 : Part de marché des fabricants de systèmes



Source : Ernst & Young (2016)

Figure 5 : Part de marché des fournisseurs de services



Source : Ernst & Young (2016)

De plus en plus, les entreprises misent sur cette technologie, qui ne cesse de progresser. A titre d'exemple, General Electric a investi 50 millions de dollars en 2012 dans un centre d'impression 3D dédié à la fabrication d'injecteurs de carburant pour les moteurs Leap, développés par CFM International. Cet investissement est justifié car ces pièces sont complexes et leur réalisation par les techniques conventionnelles est coûteuse.

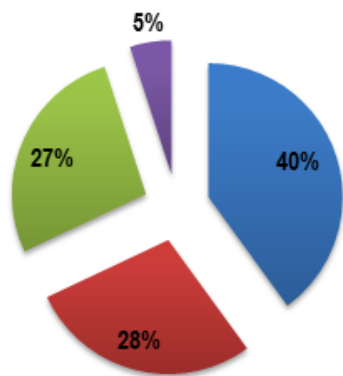
Une autre filiale du groupe Safran, Turbomeca, a également annoncé en 2013 avoir équipé son usine située à Bordes (Pyrénées-Atlantiques) d'une imprimante 3D. Pour le moment, les pièces fabriquées dans cette unité ne sont pas les plus critiques du moteur. Elles font partie des éléments fixes de celui-ci. L'avantage tiré de ces machines pour le moment est de réaliser des pièces en petite série et d'accélérer le passage du prototypage rapide à l'industrialisation du produit.

IV.2. RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE

L'Amérique du Nord et l'Europe représentent plus de deux tiers, soit 68% du Chiffre d'affaires mondial du marché de l'impression 3D, suivi par l'Asie pacifique avec 27%.

Figure 6 : Répartition des recettes du marché de l'impression 3D par région

■ Amérique du Nord ■ Europe ■ Asie pacifique ■ reste du monde



Source : rapport de Wohlers (2017)

Le plus grand marché est représenté par les Etats-Unis, car les leaders historiques du secteur des imprimantes 3D y sont implantés, à l'instar de 3D Systems et Stratasys. Le pays a surtout misé sur les équipements permettant de travailler les thermoplastiques à l'inverse de l'Europe et spécifiquement l'Allemagne, où l'intérêt est porté surtout sur l'impression 3D métal.

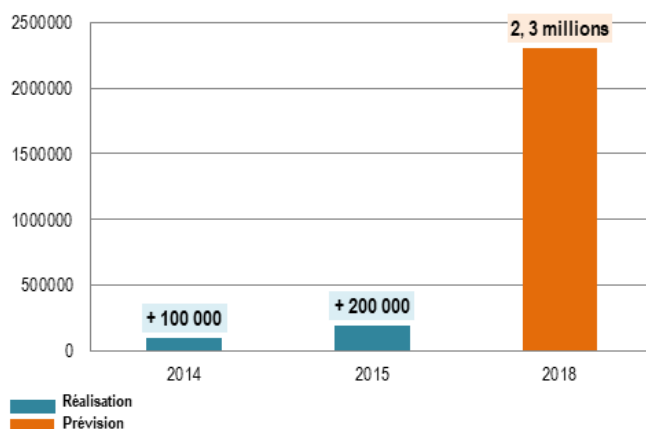
L'Allemagne vient en tête des pays européens et se positionne pour l'impression métallique grâce à la présence dans le pays de cinq des plus gros fabricants d'imprimantes métal (EOS, SLM, Concept Laser, Realizer et Trumpf). Par ailleurs, l'Allemagne a des grandes capacités à fabriquer des machines-outils de pointe pour l'impression 3D, à destination de secteurs importants comme l'automobile. Le pays n'a jamais caché ses ambitions de constructeur dans la fabrication additive et exporte déjà ses technologies à l'étranger.

Quant à la France, elle est en retard dans le secteur de l'impression 3D et les investissements dans cette technologie sont moindres. Mais l'approche a été différente et s'est effectuée de façon horizontale : Les imprimantes 3D viennent, généralement, en complément des machines traditionnelles dans les ateliers de production. On n'y rencontre pas ou peu d'usines dédiées exclusivement à l'impression 3D comme aux USA.

En général, les pays qui utilisent au plus cette technologie sont ceux qui ont une forte culture industrielle et qui trouvent dans la fabrication additive un nouveau moyen de production rapide et à des coûts moins élevés. Ceci est incarné par la prédominance des pays de l'Amérique du nord et les pays de l'Europe de l'Ouest avec plus de 60% sur le marché mondial des imprimantes 3D.

En 2015, les ventes des imprimantes 3D ont dépassé les 200 000 unités et les estimations prévoient que celles-ci atteindront les 2,3 millions en 2018. Il est à noter que la technologie à dépôt de filament est la moins chère (cout inf. à 500 dollars) et la plus répandue. Elle représente 80 % des ventes.

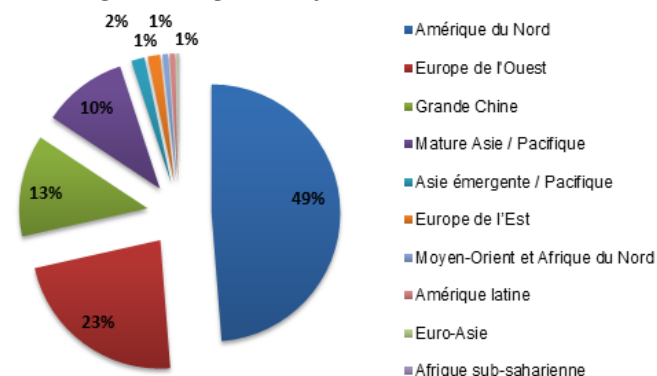
Figure 7 : Evolution de ventes mondiales des imprimantes 3D



Source : rapport de Wohlers (2015)

Le graphique ci-dessous montre que les pays de l'Amérique du nord et de l'Europe de l'Ouest accaparent la part du lion en termes de ventes d'imprimantes 3D avec plus de 65%. Suivis par la Chine et les pays de l'Asie pacifique avec 15% et 13% respectivement.

Figure 8 : Répartition de ventes des imprimantes 3D par les grandes régions (moyenne entre 2012-2015)



Source : rapport de Wohlers (2015)

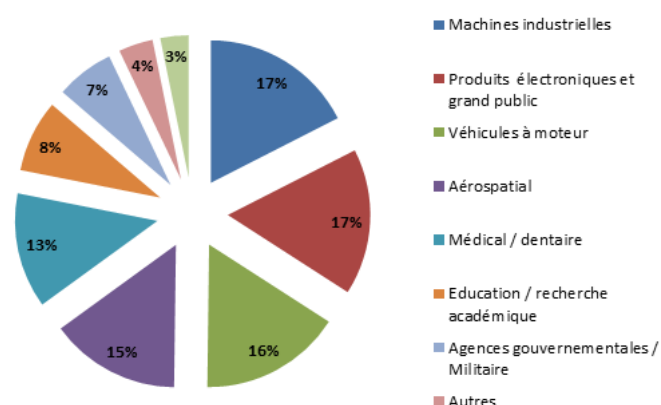
IV.3. LES SECTEURS UTILISATEURS

Malgré la croissance significative, il existe encore un potentiel inexploité dans l'impression 3D. En fait, l'impression 3D ne représente que 0,04% du marché industriel mondial dont le prototypage demeure le principal usage. Les experts estiment que cette technologie va éventuellement s'emparer de 5% de la capacité du marché de la fabrication. La plus grande opportunité réside dans la production de pièces. Celle-ci a connu une forte progression, passant d'une valeur presque nulle en 2003 à 43% des recettes du marché global en 2014.

Comme on l'a signalé précédemment, la fabrication additive couvre actuellement la plupart des secteurs d'activité, notamment l'industrie de l'automobile, l'aéronautique, la médecine, l'architecture et d'autres accessoires.

En 2015, les machines industrielles et le secteur électronique grand public sont devenus les premiers débouchés des technologies de fabrication additive avec 17%. La troisième plus grande demande concerne le marché de l'automobile (16%) où les techniques de la fabrication additive ont été principalement utilisées pour la modélisation des véhicules et des pièces. Quant à l'industrie des appareils médicaux, elle occupe la quatrième place avec 13% du marché.

Figure 9 : Secteurs d'application (part en % de l'ensemble du marché à destination des professionnels)



Source : rapport de Wohlers (2017)

La croissance notable enregistrée par le marché des machines industrielles est le résultat d'une demande accrue pour la réalisation des prototypes des pièces, d'outillages, la fabrication des pièces de rechange et des moules. Il est à noter que la part de ce secteur en termes d'installation des imprimantes 3D s'est améliorée de 4% entre 2013 et 2016 pour se stabiliser à 17%.

De même l'industrie électronique grand public a généré un résultat positif grâce à la conception de nouveaux produits et le prototypage des pièces. En effet, plusieurs entreprises opérantes dans ce secteur sont parvenues grâce à l'impression 3D à réduire le temps de validation de la conception, qui est passé d'une semaine à un seul jour et va améliorer de façon significative l'ajustement et la finition. D'autres entreprises qui fabriquent les accessoires informatiques ont vu un retour sur leur investissement initial en impression 3D en seulement huit mois. La prochaine grande opportunité d'impression 3D dans l'industrie de l'électronique réside dans la fabrication de Smartphone, principal produit vendu, avec environ 35% des ventes totales du secteur.

L'industrie d'automobile a investi tôt dans l'impression 3D. Aujourd'hui, les fabricants des pièces d'automobiles appliquent l'impression 3D principalement pour le prototypage rapide. Ceci est dû, évidemment, aux volumes de production, généralement trop élevés pour qu'ils soient réalisés par l'impression 3D. Rendre les pièces moins chères et plus légères dans un délai optimal est souvent le principal objectif de l'industrie automobile.

Quant à l'industrie médicale, l'impression 3D est appliquée pour des produits finis personnalisés, tels que les prothèses auditives et les implants. Notons que 98% des prothèses auditives dans le monde sont actuellement fabriquées par l'impression 3D.

IV.4. LES TENDANCES DE LA FABRICATION ADDITIVE

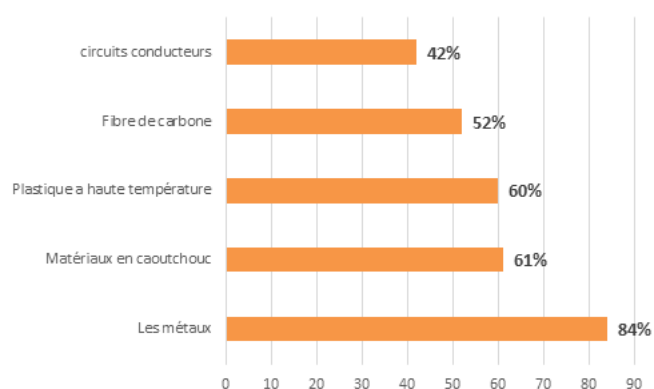
L'avenir apparaît radieux pour la fabrication additive. Les prévisions estiment que la vitesse moyenne de production de l'imprimante 3D va augmenter de 88% d'ici 2023. À mesure que la vitesse de l'imprimante augmente, les capacités de volume sont susceptibles d'évoluer.

De plus, les nouvelles combinaisons de matériaux d'impression 3D, ainsi que les améliorations apportées aux matériaux existants, permettront non seulement des applications d'impression 3D sans précédentes, mais aussi une réduction importante du coût de revient. Les recherches seront axées, prochainement, sur le développement de l'impression 3D métal afin de répondre au besoin exprimé par les acteurs concernés. En fait, selon l'étude réalisée en

2015 par Stratasys, 84% des interrogés ont déclaré qu'ils aimeraient voir un développement de l'impression 3D avec les métaux contre 60% avec le plastique.

Les progrès dans les technologies et les capacités d'impression stimuleront également le développement de nouveaux équipements et applications, à l'instar l'électronique imprimée en 3D.

Figure 10 : Les matériaux imprimés en 3D que les interrogés veulent voir dans l'avenir



Source : Enquête de Stratasys (2015)

D'autre part, les récents progrès de cette technologie ont permis l'impression 3D de matériaux biocompatibles, de cellules et de composants de support dans des tissus vivants fonctionnels ; on parle ainsi de la bio impression 3D. Celle-ci est appliquée à la médecine régénérative. Pour l'histoire, la bio impression 3D a été une véritable révolution dans le domaine de la santé depuis le développement, en 1988, de tissus synthétiques en 3D par le Docteur Robert J. Klebe de l'Université du Texas en utilisant une imprimante inkjet classique. A noter que l'année 2002 a annoncé l'émergence du premier organe grâce à la bio-impression, un rein à échelle réduite.

Comparée à l'impression non biologique, la bio impression 3D implique des complexités supplémentaires, telles que le choix des matériaux, les types de cellules, les facteurs de croissance et de différenciation et des défis techniques liés aux sensibilités des cellules vivantes et à la construction des tissus. Pour répondre à ces complexités, la bio impression intègre les technologies des domaines de l'ingénierie, de la biométéorologie, de la biologie cellulaire, de la physique et de la médecine.

Il est à signaler que la bio impression 3D a été utilisée récemment pour la génération et la transplantation de

plusieurs tissus, y compris la peau multicouche, l'os, les greffes vasculaires, les attelles trachéales, le tissu cardiaque et les structures cartilagineuses.

En réalité, la bio impression a connu un grand essor dans les dernières années et demeure encore prometteuse. De ce fait, les recherches se sont orientées à appuyer ce domaine émergent en raison de multitudes solutions qu'il offre à des cas de santé compliqués ayant restés longtemps, des problèmes difficiles à résoudre.

L'année 2017 a marqué la naissance d'une nouvelle technologie dans le domaine de la fabrication additive nommée « impression 4D ». C'est un processus par lequel un objet imprimé en 3D se transforme en un autre par l'influence de l'apport d'énergie externe comme la chaleur, la lumière ou d'autres stimulants environnementaux.

L'avantage le plus évident de l'impression 4D est que les objets de dimensions trop grandes pour les imprimantes 3D, peuvent être imprimés en une seule partie grâce à cette technique l'objet peut rétrécir (on parle alors de forme secondaire de l'objet) pour s'adapter à l'imprimante 3D puis retrouver sa forme réelle.



V. LES STRATEGIES OCCIDENTALES POUR SOUTENIR LA FABRICATION ADDITIVE





V.1. CAS DES ETATS UNIS

La fabrication additive avait pris une autre dimension depuis le discours de Barak Obama au Congrès des États-Unis en Janvier 2013. Cet événement a représenté réellement un point d'inflexion pour l'écosystème de l'impression 3D aux Etats-Unis. A la suite de la déclaration du président, les efforts américains se sont concentrés autour d'un réseau national pour l'innovation manufacturière (NNMI), nommé America Makes qui a vu le jour la même année. Ce réseau est un partenariat public-privé englobant les intervenants de la fabrication additive tels que les universités, les structures publiques et les sociétés privées autour de formations, de rencontres, de projets de recherche et d'initiatives de l'industrie et du grand public.

Ce réseau, qui est soutenu financièrement par l'État (à raison de 50 millions de dollars de sur cinq ans) a permis de former plus de 7000 opérateurs aux bases de la fabrication additive.

En janvier 2015, America Makes a reçu plus de 48 millions de dollars pour financer les recherches de la fabrication additive. Le gouvernement américain a créé également, en 2014, un groupe collaboratif sur la fabrication additive appelé «additif GO» par la participation de 130 fonctionnaires d'institutions nationales clés telles que l'armée américaine et l'armée de l'air, FAA, ENSA et NIST. On cite également le Consortium de fabrication d'additifs créé par l'institut Edison Welding (EWI) en 2010 comprenant 17 entreprises axées sur le développement de l'impression 3D de métal.



V.2. CAS DE L'ALLEMAGNE

Le gouvernement allemand a mis en place une stratégie nommée "Industrie 4.0" à travers le Ministère de l'Éducation et de la Recherche (BMBF) et le Ministère de l'économie et de l'énergie (BMWi). Même si elle ne fait pas explicitement référence à l'impression 3D, cette stratégie vise à stimuler la fabrication numérique en augmentant la numérisation et l'interconnexion des produits, des chaînes de valeur et des modèles commerciaux. Elle vise également à soutenir la recherche, la mise en réseau des partenaires de l'industrie et la normalisation.

Pour soutenir ce domaine émergent, l'Allemagne a déboursé entre 2003 et 2013 un financement de 21,2 millions d'euros aux activités de recherche en liaison avec la fabrication additive. De plus, les institutions et notamment la Fondation Steinbeis ou la Fraunhofer Gesellschaft ainsi que les universités jouent un rôle éminemment important pour le développement des nouvelles technologies et particulièrement l'impression 3D.

Du côté des entreprises, les leaders industriels Allemands tels que Siemens ont intégrés la fabrication additive depuis longtemps dans leur processus productif et utilisent ses derniers développements pour promouvoir leurs produits et accroître leurs notoriétés.



V.3. CAS DU ROYAUME-UNI

En 2012, le Royaume-Uni, a adopté la «Stratégie de fabrication à haute valeur ajoutée 2012-2015», avec un budget de 97 millions d'euros. Cette stratégie avait inclut une série de mesures clés pour le développement des procédés de fabrication. Parmi ces mesures, on cite le renforcement de la High Value Manufacturing Catapult (HVMC). Dans ce cadre, le Conseil de la Stratégie Technologique (TSB) a déboursé à lui seul plus de 30 millions d'euros entre 2012 et 2015 et 8 millions d'euro en 2016 pour soutenir des projets dédiés principalement à la fabrication additive métallique.

Aujourd'hui, la moitié de la dotation affectée au programme de fabrication à haute valeur ajoutée est consacrée au consortium HVMC, dispositif-tremplin qui coordonne les activités de 7 centres techniques en charge de fournir une expertise transversale aux PME comme aux grands opérateurs industriels du pays. Ce consortium a notamment pour objectif d'accélérer la diffusion des technologies dans le monde industriel, de façon à permettre à terme le doublement de la contribution du secteur manufacturier au PIB britannique.

Parallèlement, les techniques de fabrication avancées ont continué de bénéficier d'un solide soutien des autorités qui ont annoncé récemment que 20 projets de type « Supply Chaine » bénéficieront de 238 millions d'euros d'allocation, dont 38% sont financées par l'Etat. L'impression 3D est présente également dans le secteur de la défense. En fait, le Centre de l'Etablissement de Défense demande périodiquement des offres pour la modernisation des équipements militaires britanniques et organise des événements sur les technologies de fabrication additive tels que l'événement "Market place" tenu en février 2015.



V.4. CAS DE LA FRANCE

Bien que l'expérience française dans le domaine de la fabrication additive reste modeste par rapport à celles des Etats-Unis, de l'Allemagne et du Royaume-Uni, ce pays avait entrepris dans les trois dernières années plusieurs initiatives visant à mobiliser les acteurs autour du projet "Industrie du Futur". Parmi lesquelles, on cite les initiatives du Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM), notamment en matière de mutualisation des machines, ainsi que l'implication des écoles et universités. Parallèlement, l'Association française de prototypage rapide (AFPR) s'est attelée depuis sa création en 1992 à sensibiliser à l'importance de la fabrication additive.

Pour pouvoir rattraper le retard et joindre les pays développés en la matière, la France s'est engagée d'ores et déjà dans un plan stratégique pour développer la fabrication additive. Dans le cadre de cette stratégie, l'État a alloué un montant de 52 millions d'euros pour soutenir les projets de R&D et d'innovation. Ces projets concernent respectivement : la fabrication d'échangeurs thermiques par impression 3D métallique, la levée des verrous technologiques de plusieurs procédés d'impression 3D pour le secteur de l'aéronautique, la mise au point de solutions en matière de poudres métalliques et de nouvelles générations de machines. En outre, la France a prévu des nombreux avantages pour encourager les entreprises à utiliser l'impression 3D à l'instar du dispositif d'accompagnement « 3D Start PME ».

Comme d'autres pays, la France œuvre pour la diffusion de la culture de la fabrication additive aux nouvelles générations en équipant les écoles et les lycées par des imprimantes 3D.



VI. LE DÉVELOPPEMENT DE LA FABRICATION ADDITIVE EN TUNISIE



VI.1. SITUATION NATIONALE

Au-delà de la fabrication d'outillage et du prototypage, la fabrication additive est économiquement viable pour fabriquer directement des pièces fonctionnelles. L'application de l'impression dans la production de pièces constitue pour la Tunisie un axe de développement récent et accessible. Il s'agit d'un nouveau défi et d'une opportunité à saisir, avec de considérables enjeux de compétitivité.

En Tunisie, la fabrication additive n'a commencé à s'introduire que très récemment et son exploitation reste très modeste par rapport aux expériences mondiales. L'expérience tunisienne en la matière est restée limitée au niveau des clubs de fabrication numérique dans les écoles d'ingénieurs et les manifestations sur le développement technologique organisées par les institutions publiques à l'instar de « SMART Industrie » organisée par l'APII en Mai 2017.

Il faut dire que l'impression 3D est très peu connue par les entrepreneurs et la Tunisie ne compte actuellement qu'une dizaine d'entreprises qui appliquent cette technique dans leur chaîne de production. Ces dernières appliquent l'impression 3D pour le prototypage rapide et la réalisation de maquette avant le passage à la production en série. Ces entreprises travaillent dans la création des prototypes (des pièces mécaniques ou artistiques, des bijoux), la réplique des objets et la fabrication des objets décoratifs ou publicitaire personnalisés. Il est à noter que pas mal d'entre elles ont employé la fabrication additive en marge de leurs activités principales telles que le développement de l'application logicielle, infographie, etc. On compte aussi quelques entreprises tunisiennes qui opèrent dans la commercialisation des imprimantes 3D et des scanners 3D.

En revanche, l'expérience des FabLabs en Tunisie a commencé à prendre de l'envol à travers la création, depuis peu, de plusieurs ateliers de fabrication numérique, à l'instar de « FABLAB Jeunes Science de Tunisie » créé en 2015 par La fondation Orange et l'Association Jeunes Science de Tunisie à La Cité El Khadhra dans le but de soutenir l'innovation et mettre à disposition des entrepreneurs et élèves, un espace de vie et de créativité par le numérique. On note également que l'Institut Internationale de Technologie (IIT) a créé en août 2017 le premier Fablab dans la région de Sfax. Cet espace de créativité a été équipé par un ensemble d'outils et de machines bien développés et a

été mis à la disposition des étudiants afin de développer leurs capacités et de concrétiser leurs connaissances théoriques par des projets bien définis. Le fablab de l'IIT est constitué d'un atelier de prototypage 3D, un atelier de bricolage dédié à tout type de fabrication manuelle, un atelier d'usinage pour la fabrication mécanique assistée par ordinateur et un atelier d'électronique permettant d'utiliser les circuits imprimés et les cartes électroniques, principalement en robotique et aéromodélisme.

Toutefois, l'expérience tunisienne dans le domaine de l'impression 3D demeure encore jeune au regard du potentiel de cette technologie. En effet, la fabrication additive pourrait motiver les jeunes diplômés à créer leur startup. Les petites entreprises pourront également s'approprier de cette technologie pour améliorer leurs compétitivités.

De ce fait, l'impression 3D et l'industrie numérique pourraient représenter pour les entreprises européennes une solution aux coûts de la main d'œuvre et de la relocalisation. Ce qui pourrait constituer éventuellement une menace pour le tissu industriel tunisien qui est basé essentiellement sur l'industrie de sous-traitance depuis les années 70.

Pour cette raison, il s'avère primordial pour la Tunisie de mettre en place une stratégie nationale pour la promotion de la fabrication additive de façon à permettre la migration de l'industrie tunisienne vers l'industrie 4.0. Ceci nécessite, bien évidemment, un ensemble de mesures pour sensibiliser les acteurs concernés de l'importance de l'impression 3D et de ses avantages. En parallèle, il serait intéressant d'impulser la recherche notamment dans le domaine des matériaux, le principal pilier, de la fabrication additive.

VI.2. RECOMMANDATIONS

L'enjeu consiste à mobiliser davantage d'acteurs et de secteurs. A cet égard, les recommandations ci-après visent à renforcer la compétitivité des entreprises, de s'orienter vers des produits plus performants et innovants. La Tunisie devra être au diapason avec cette tendance, ce qui est déterminant pour la compétitivité de ses entreprises et pour son intégration dans les chaînes de valeurs mondiales. Pour ce faire, les actions porteront sur 3 axes :

- La promotion de la recherche et l'innovation,
- L'accompagnement et l'assistance des entreprises,
- La formation et la diffusion de la culture de la fabrication additive.

Tableau 5 : Plan d'actions

Axe	Action	Délai
RECHERCHE ET INNOVATION	- Etablir une stratégie nationale pour développer les technologies avancées de la production notamment la fabrication additive.	Court terme
	- Créer un fonds spécial pour encourager l'innovation dans les technologies avancées notamment l'impression 3D.	Court terme
	- Mettre en place des Fablabs dans les universités et les centres de formation professionnels et les pépinières d'entreprises en les équipant par les moyens nécessaires (imprimantes 3D, scanners 3D, logiciels de conception, matériaux,..., etc.).	Moyen terme
	- Multiplier les manifestations sur les nouvelles technologies de fabrication numérique à l'image de SMART Industrie 2017 (robotique, impression 3D, IoT,...).	Court terme
	- Créer une plateforme de mutualisation d'équipements et compétences pour soutenir la recherche, l'intégration et la diffusion de la technologie de l'impression 3D vers les PME.	Moyen terme
ASSISTANCE ET ACCOMPAGNEMENT	- Mettre en place un programme de formations courtes et modulaires pour toutes les entreprises, et en particulier les PME permettant d'apporter au personnel les nouvelles qualifications nécessaires.	Court terme
	- Mettre en place un programme d'accompagnement à la fabrication additive et numérique dédiée aux PME afin d'assister les entreprises à se développer dans cette voie et créer un fond pour ce programme qui portera deux axes: o Diagnostic et aide au choix de la technologie ; o Aide financière et appui dans les démarches d'installation des procédés de fabrication additive et numérique.	Moyen terme
	- Inciter les entreprises de l'industrie aéronautique ou automobile implantées en Tunisie à créer des sites dédiés à la fabrication additive à l'image de l'usine de « Thales » inaugurée récemment (Septembre 2017) à Casablanca.	Moyen terme
	- Encourager les sous-traitants en plasturgie, en usinage et le traitement de surface à intégrer la fabrication additive dans leur processus de production en marge de leurs activités principales.	Moyen terme
	- Soutenir l'investissement des entreprises dans la fabrication additive à travers des mesures fiscales spécifiques permettant aux PME de diminuer la durée d'amortissement des équipements.	Court terme
FORMATION	- Sélectionner des formateurs de tous les niveaux de l'enseignement dans le cadre d'un programme de formation des formateurs afin de leur procurer les compétences requises dans ce domaine.	Court terme
	- Créer des centres d'innovation dans les instituts pour sensibiliser les nouvelles générations sur cette nouvelle technologie de fabrication en équipant ces établissements par des petites imprimantes 3D à dépôt de filament. Cette action peut se limiter au début aux lycées pilotes avant de la vulgariser sur tous les collèges et lycées dans un stade ultérieur.	Moyen terme
	- Introduire les thématiques de la fabrication additive dans les programmes d'enseignement secondaire et supérieur, et même au niveau des centres de formation professionnelle.	Court terme

Court Terme: [1, 2 ans]

Moyen Terme: [3,5 ans]

VII. FICHES DE PROJETS





FABLAB

TYPE « ÉDUCATIONNEL »

OBJECTIFS :

- Permettre aux étudiants de réaliser des prototypes pour leurs projets de fin d'études et ouvrir un espace multidisciplinaire et ouvert vers l'extérieur.

STRUCTURE PORTEUSE:

- Financé par l'université associée au Fablab et par des aides publiques.

FRÉQUENTATION :

- En moyenne une dizaine de personnes pour les journées dédiées à la formation et les cours.
- Le nombre peut augmenter lorsqu'il y a des projets à finaliser.

MARCHÉ CIBLE :

- Les étudiants voulant pratiquer la fabrication numérique ou réaliser de prototypes de leurs projets de fin d'études.
- Les chercheurs pour réaliser leurs projets.

SERVICES :

- Des programmes sont proposés pour développer l'accès aux sciences et techniques et démocratiser leur pratique ;
- Des formations et cours sur l'usage des machines à commande numérique, plate-forme de prototypage rapide type Arduino, logiciels de conception, impression 3D, etc ;
- Des services de prototypages pour les étudiants à des prix modiques ;

TYPES DE PROJETS :

- Projets d'ingénierie, de design et d'architecture.

AGENDA TYPE :

- Deux journées « Open Lab » gratuite par semaine pour les étudiants et le public.
- Les autres jours sont réservés aux projets des étudiants et chercheurs venues réaliser des prototypes.

RESSOURCES HUMAINES :

- 1 administrateur,
- 1 secrétaire,
- 1 « Fab Manager » de formation ingénieur industriel ou mécanique.

MODÈLE ÉCONOMIQUE :

- Le fablab « éducationnel » est à but non lucratif. En fait, Il est dédié aux étudiants afin de leur permettre de se familiariser avec les technologies de fabrication numériques et les aider à réaliser des prototypes dans le cadre de leurs projets de fin d'études à des prix modiques.

Toutefois, la mission de cet atelier peut s'élargir jusqu'à la réalisation des prototypes de produits dans le cadre d'un programme de partenariat avec des entreprises privées, ce qui va permettre la procuration d'autres sources de financement.

BUDGET DE DÉPART :

- Le budget de départ est estimé 200 milles dinars. Il inclut les investissements liés aux achats des équipements et des consommables, l'aménagement de l'espace, les salaires de personnel pour la première année et les frais de l'exploitation (électricité, chauffage,...).

LOCALISATION :

- Université : école d'ingénieur ou institut supérieur des études technologiques (superficie demandée de 250 m2). L'atelier sera formé d'une salle de fabrication contenant tous les équipements, une salle de stockage de matériaux et d'outillage, deux bureaux, une salle de formation et de présentation des projets réalisés et d'un espace d'accueil.

EQUIPEMENTS

Matériel	Usage	Nombre
Imprimante 3D pour débutant (FDM)	• S'initier à l'impression en 3D. • Réaliser des objets simples en plastique.	2
Imprimante de plastic professionnelle (FDM)	• « Impression » de pièces à la demande • Création de moules • Maquettage	2
Scanner 3D	• Analyse les objets ou leur environnement proche pour recueillir des informations précises sur la forme et éventuellement sur l'apparence (couleur, texture...) du produit.	1
Découpe laser	• Découpe de très nombreux matériaux (bois, papier, carton, PMMA, cuir, etc.) • Marque les matériaux (comme le métal, l'aluminium, la pierre, etc.) • Gravure (la gravure permet de « supprimer » plus de matière que le marquage).	1
Perceuse	• Perçage de différents matériaux.	1
Défonceuse numérique (CNC ROUTER)	• Découpe des matériaux (Bois, plexiglas, acrylique.)	1
Ordinateur HP Sprout	• Concevoir un objet en 3D.	1
Ordinateurs équipés par des logiciels de CAO	• Formation • Conception d'un objet à travers un logiciel de CAO.	4
Plates-formes de prototypage électronique de type ARDUINO.	• Contrôler de puces, de capteurs, • Piloter un robot, etc.	2
Lot d'outillages mécaniques	• Finition des pièces	1

CONSOMMABLES :

- Matériaux de l'impression:
 - Filament plastique ABS ou PLA,
 - La poudre de polyamide.
- Les matériaux de support : PVA et HIPS,
- Autres métaux : bois, tôle métallique, mastic,..., etc.



FABLAB

PRIVÉ - BUSINESS

OBJECTIFS :

- Offrir les possibilités de prototypage rapide, outillages, conseil aux entreprises, location de machines, formations et cours, services personnalisés.

SERVICES :

- Tous les services nécessaires pour mener un projet dès sa conception à sa réalisation ;
- Conseil, formations, assistance technique, mise à la disposition des entreprises et entrepreneurs.

MARCHÉ CIBLE :

- Les entreprises voulant faire du prototypage rapide.
- Les entrepreneurs pour développer leurs projets.
- Les startups

TYPES DE PROJETS :

- Application du prototypage rapide.
- Outillages
- Moule.
- ..etc.

INVESTISSEMENT INITIAL :

- L'exemple de l'acquisition d'une machine d'impression 3D métallique professionnelle avec une bonne taille d'impression coûterait en moyenne 800 mille dinars.
- Le budget d'investissement initial est estimé à 1,5 million de dinars.
- Le budget d'investissement initial prend en charge :
 - L'aménagement de la salle de la machine d'impression 3D métallique et de l'espace.
 - L'achat des équipements, de matériels informatiques, des softwares et autres matériaux.
 - Les salaires des membres du staff (pour un bon démarrage du projet, il est préconisé la prise en charge des salaires pendant la première année).
 - Les frais de gestion et d'exploitation de 3 mois (électricité, chauffage, réparation des machines).

LOCALISATION :

Pépinière d'entreprises (espace nécessaire estimé 450 m² au minimum). Le FabLab est formé d'une salle pour la fabrication numérique (conception et impression 3D), une salle contenant les équipements mécaniques (fraiseuse, défonceuse,...), une salle de formation, un espace pour le stockage des consommables, deux bureaux et un espace d'accueil.

RESSOURCES HUMAINES :

- 1 gardien,
- 1 administrateur,
- 1 secrétaire,
- 2 « Fab Managers » à mi-temps : 1 designer et 1 ingénieur.

REVENUS :

- Les poudres métalliques sont encore chers : le prix d'un kg de poudre d'aluminium avoisine les 300 DT, celui de l'acier inoxydable est entre 300-600 DT/kg sans parler de la poudre de titane qui est de l'ordre de 1200 DT/kg.
- Les charges d'exploitation de ce type de fablabs sont estimées à 30 mille dinars mensuellement, et ce, sans tenir compte des amortissements des investissements. L'utilisation des services du fablab par les entreprises et les startups en plus de la formation doivent couvrir ces charges.
- Les charges d'exploitation prennent en compte :
 - Les salaires de l'équipe
 - La maintenance et la réparation des machines et leur entretien
 - Les coûts liés à l'exploitation et les frais de gestion de lieux (location, chauffage, électricité ; internet, etc.)
 - L'achat de petits matériels et consommables.

EQUIPEMENTS

Matériel	Usage	Nombre
Imprimante de plastique professionnelle	• « Impression » de pièces à la demande • Création de moules • Maquettage	1
Imprimante de résine (SLA+DLP) professionnelle	• « Impression » de pièces à la demande • Création de moules • Maquettage	1
Imprimante de poudre métallique industrielle	• « Impression » de pièce à la demande • Création de moules • Maquettage	1
Scanner 3D	• Analyse les objets ou leur environnement proche pour recueillir des informations précises sur la forme et éventuellement sur l'apparence (couleur, texture...).	1
Découpe laser	• Découpe de très nombreux matériaux (bois, papier, carton, PMMA, cuir, etc.) • Marque les matériaux (comme le métal, l'aluminium, la pierre, etc.) • Grave (la gravure permet de « supprimer » plus de matière que le marquage).	1
Fraiseuse numérique	• Fraisage de différents matériaux (enlever de la matière : bois, mousse, etc.) • Création de moules • Création de circuits imprimés via l'utilisation de films de cuivre sur des plaques d'époxy) • Certaines font office de « scanner » 3D en remplaçant la fraise par un palpeur	1
Défonceuse numérique (CNC router)	• Fraisage de bois massif • Moule de grande taille • Utilisation proche de la fraiseuse numérique mais avec un espace de sécurité	1
Perceuse	• Perçage de différents matériaux	1
Découpe vinyle	• Découpe des matériaux comme le vinyle, certains papiers, des films transferts et certains tissus • Découpe de films de cuivre autocollant pour créer des circuits imprimés	1
Ordinateur HP sprout	• Concevoir un objet en 3D.	1
Ordinateurs équipés par des logiciels de CAO	• Formation • Concevoir un objet sur un logiciel de CAO.	6

NB : La liste des équipements et des consommables susmentionnée n'est pas exhaustive. L'atelier devrait disposer d'un lot d'outillage mécanique comme prévu pour la finition des pièces (meule à carottes, polisseuse, scie, pince, tourne vis, lime,..., etc.).

CONSOMMABLES ET OUTILLAGES ::

- Matériaux d'impression :

- Filament plastique ABS ou PLA,
- La poudre de polyamide.
- La résine liquide

• Les poudres métalliques : l'acier inoxydable, le titane, l'aluminium.

- Les matériaux de support : PVA et HIPS

- Autres métaux : bois, tôle métallique, mastic,..., etc



RESSOURCES HUMAINES :

- 1 chef de projet,
- 1 secrétaire,
- 1 chirurgien orthopédiste à temps partiel,
- 1 designer,
- 1 ingénieur en conception mécanique,
- 1 technicien de maintenance,

A noter que le staff technique devrait recevoir les formations requises sur les techniques de fabrication additive, particulièrement son application dans le domaine médical.

INVESTISSEMENT INITIAL :

- L'investissement initial peut diminuer en réalisant les analyses de l'IRM dans un hôpital, polyclinique ou un centre d'imagerie médicale. Dans ce cas, le coût d'investissement est estimé à 2.4 millions dinars.
- A noter que l'investissement initial comprend :
 - L'aménagement d'un espace
 - L'achat des équipements et des matériaux
 - Les frais de gestion et d'exploitation nécessaires au démarrage du centre pour 3 mois (main d'œuvre, électricité, chauffage, maintenance et réparation des machines)

CENTRE DE FABRICATION DES IMPLANTS PAR L'IMPRESSION 3D

OBJECTIFS :

- Fabrication des implants orthopédiques.

STRUCTURE PORTEUSE :

- Etablissement de santé.

SERVICES :

- Fabrication des implants personnalisés et d'une grande précision pour les patients souffrant des troubles au niveau des articulations qui nécessitent des prothèses en utilisant l'impression 3D par frittage laser de poudre métallique.
- Le centre d'impression 3D permet de fabriquer des prothèses personnalisées, moins douloureuses et moins stressantes pour le patient avec un temps d'adaptation plus rapide et évidemment des frais chirurgicaux plus bas qui résultent souvent de l'hospitalisation et des traitements supplémentaires. Elle permet également de fabriquer des implants ayant des géométries complexes qui ont été depuis peu difficilement réalisables ou impossibles à réaliser avec les méthodes de fabrication traditionnelles (fraisage, tournage, coulage, etc.) dans un délai plus court.

MARCHÉ CIBLE :

- Tunisie.
- Pays de la région.

TYPES DE PATHOLOGIES :

- Prothèses de hanche
- Prothèses de genou
- Implants d'épaule

MATÉRIAUX UTILISABLES :

- Les poudres métalliques : alliages de titane biocompatible (1200-1500 DT/kg) ou les alliages du Cobalt chrome 750 DT/kg.
- Matériaux d'impression antioxydant et matériaux plastique.
- Matériaux de support.

REVENUS :

- Les prix affichés par les polycliniques tunisiennes, par exemple pour les prothèses de genoux débutent à plus de 10 000 dinars, la prothèse de la hanche est beaucoup plus chère.
- Le prix de départ de l'implant imprimé en 3D dans ce centre sera de 3000 dinars. Le prix varie en fonction de la complexité de la pathologie.
- Les revenus de ce centre sur la base de 250 jours de travail sont estimés à environ 2 millions de dinars par an.

MODÈLE ÉCONOMIQUE :

- Le financement sera assuré au démarrage par le ministère de la santé publique ou un organisme de santé ou dans le cadre d'un programme de coopération internationale.
- L'opération de la prothèse totale de hanche est couteuse et l'implant représente 35% du coût de l'opération.
- L'augmentation de l'espérance de vie a induit systématiquement un phénomène de vieillissement de la population tunisienne. Par conséquent, le nombre des patients opérés chaque année sur les prothèses de hanche et de genou a augmenté considérablement.
- Le développement d'une telle technologie personnalisée dans ce secteur permettrait d'améliorer les soins de beaucoup de patients et d'en diminuer les coûts.
- Ce centre peut offrir ses services à une clientèle des pays de la région en coopération avec les établissements de santé en Tunisie.

LOCALISATION :

- Hôpital universitaire ou hôpital d'orthopédie ou un centre lié à une polyclinique (superficie de 400 m2 au minimum).
- L'espace est composé, en cas ou l'image de l'IRM se fera dans les établissements de santé ou d'imagerie médicale, d'une salle pour l'appareil tomodensitométrie, un atelier de fabrication contenant les équipements de conception et d'impression 3D, d'un espace de stockage des matériaux utilisables, salle de réunion, de 2 bureaux séparés pour les cadres techniques et administratifs et d'un espace d'accueil pour le secrétariat.

NB : L'activité du centre peut s'étendre plus loin pour toucher, dans l'avenir, d'autres applications dans le domaine de la santé telles que prototypes d'implants crâniens- d'implants de cage thoracique.

PROCESSUS :

- L'image de l'IRM sera faite dans un centre hospitalier.
- Les scanners 3D permettent de numériser en 3D l'articulation du patient.
- Une fois numérisé en 3D, le modèle 3D peut être modifié par un technicien à l'aide d'un logiciel de modélisation 3D afin d'être parfaitement ajusté à la morphologie du patient.
- Les ingénieurs cliniciens vérifient la résistance de l'implant face aux différentes sollicitations mécaniques à travers des simulations sur le logiciel de conception.
- Les mêmes données sont utilisées par le chirurgien pour déterminer comment placer exactement l'implant du patient.
- Une fois que la modélisation 3D du modèle est terminée, il est envoyé pour être imprimé en 3D
- L'implant subit ensuite un traitement de polissage de surface.
- Comparer la pièce finie au modèle virtuel pour s'assurer de la réussite du processus post-impression.
- Les implants subiront un traitement thermique pour améliorer la cohésion du matériau et obtenir les bonnes propriétés mécaniques et pour augmenter la solidité et la durabilité des pièces encore poreuses et de géométries souvent complexes

EQUIPEMENTS

Matériel	Usage	Nombre
IRM (l'imagerie IRM sera faite dans l'établissement de santé)	• Fournir des images tridimensionnelles et en coupe de grande précision anatomique.	-
Scanner à rayon X ou la tomodensitométrie	Obtenir une image 3D de l'articulation, pour recréer une prothèse parfaitement adaptée à la morphologie du patient.	1
Imprimante 3D professionnelle de plastique	• Impression des composants de l'implant en plastique	1
Scanner 3D	• Analyse les objets ou leur environnement proche pour recueillir des informations précises sur la forme et éventuellement sur l'apparence (couleur, texture...).	1
Imprimante 3D professionnelle métallique pour les applications orthopédiques	« Impression » de pièce à la demande	1
Laser Nikon LC15Dx	• Comparer la pièce finie au modèle virtuel	1
Four de traitement thermique sous vide de fabrication additive (exemple : Four Horizontal sous vide gamme Turquoise de ECM technologies)	• Traiter les implants fabriqués par impression 3D.	1
Ordinateurs équipés par un logiciel de conception tel qu'Autodesk Within Medical	• Concevoir l'implant sur un logiciel de CAO.	1
Autres outils mécaniques (polisseuse, limes, ...etc.)	• Améliorer l'état de surface de l'implant.	-

BIBLIOGRAPHIES

Rapport :

[1] : Impression 3D- 1ère édition : du Mathilde Berchon-Editeur Eyrolles.

[2] : EY's Global 3D printing Report 2016: How will 3D printing make your company the strongest link in the value chain?

[3] : THE STATE OF 3D PRINTING : The data you need to understand the 3D Printing world and build your 3D Printing strategy - Edition 2017 – Sculpteo.

[4] : High Value Manufacturing Strategy 2012-2015 – Technology Strategy Board.

[5] : Germany: Industrie 4.0 - January 2017- European commission.

[6] : L'impression 3d : porte d'entrée dans l'industrie du 21ème siècle- Joël ROSENBERG, Conseil général de l'Armement Pascal MORAND, CCI Paris Ile de France Dominique TURCQ, Institut Boostzone.

Site web :

<https://www.sculpteo.com/fr/impression-3d/technologies-dimpression-3d/>

<https://www.iso.org/fr/committee/629086/x/catalogue/p/1/u/0/w/0/d/0>



AGENCE DE PROMOTION
DE L'INDUSTRIE ET DE L'INNOVATION

NOTE SUR L'IMPRESSION 3D

JANVIER 2018